

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CIBELE LEMOS FREIRE VIGINOSKI

**SISTEMA UTILIZANDO VIBRAÇÃO DE UM TRANSDUTOR
PIEZOELÉTRICO PARA MEDIR DENSIDADE DE UM LÍQUIDO.**

**CURITIBA
2013**

CIBELE LEMOS FREIRE VIGINOSKI

SISTEMA UTILIZANDO VIBRAÇÃO DE UM TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO
PARA MEDIR DENSIDADE DE UM LÍQUIDO

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica na área de Sistema Eletrônico da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Dr. Eduardo Parente Ribeiro

CURITIBA
2013

Viginoski, Cibele Lemos Freire.

V677 Sistema utilizando vibração de um transdutor piezoelétrico para medir densidade de um líquido. Curitiba, 2013.
81 f.: il.; tab., graf.

Orientador: Dr. Eduardo Parente Ribeiro.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Sistema Eletrônico, Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

1. Medição de densidade. 2. Transdutor piezoelétrico. 3. Viscosidade. 4. Concentração de açúcar. 5. Temperatura. I. Ribeiro, Eduardo Parente. II. Universidade Federal do Paraná.

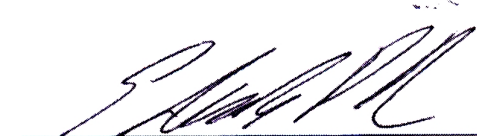
CDU 621.317

TERMO DE APROVAÇÃO

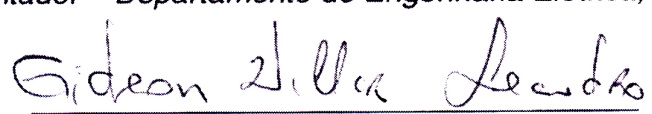
CIBELE LEMOS FREIRE VIGINOSKI

SISTEMA UTILIZANDO VIBRAÇÃO DE UM TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO PARA MEDIR DENSIDADE DE UM LÍQUIDO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, na área de Sistema eletrônico da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



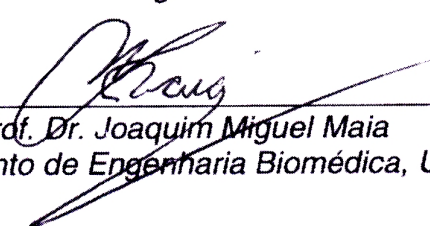
Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro
Orientador – Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR



Prof. Dr. Gideon Villar Leandro
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR



Prof. Dr. Gustavo Oliveira
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR



Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia
Departamento de Engenharia Biomédica, UTFPR

Curitiba, 08 de fevereiro 2013.

Dedico esse trabalho aos meus Pais, ao meu esposo Alex por estar sempre presente quando preciso tanto efetivamente quanto profissionalmente, e aos meus amigos que me incentivaram e apoiaram nessa conquista.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro, pelo acompanhamento e orientação, aos professores da banca Dr. Gideon Villar Leandro, Dr. Gustavo Oliveira e Dr. Joaquim Miguel Maia que auxiliaram na correção.

Aos meus amigos e familiares, pela compreensão aos momentos de ausência, pela motivação, por estarem sempre prontos a cooperarem e ajudarem.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, a área de Sistema Eletrônico da Universidade Federal do Paraná, pelo apoio recebido.

Agradeço ao SENAI por me disponibilizar algumas horas para me dedicar a esta dissertação.

A TODOS, um muito OBRIGADA!

RESUMO

As medições contínuas de densidade são ações que garantem a qualidade e a uniformidade de produtos nos processos industriais. Isso inclui indústrias de alimentos, petroquímicas, químicas, celulose entre outras. No mercado da automação industrial existem vários tipos de sensores para leitura de densidade. São instrumentos que utilizam diferentes métodos como efeito Coriolis, medição por pressão diferencial, medição por raios gama e medição por diapasão vibrante. Em geral, alta precisão implica em custo elevado. E, devido ao custo elevado, muitas empresas de pequeno porte ainda utilizam os métodos laboratoriais para obter a densidade de um produto, o que atrasa o processo de fabricação, diminui a qualidade e uniformidade do mesmo. O presente trabalho apresenta um sensor para medição de densidade a baixo custo. Utilizando o conceito de vibração e amortecimento quando em contato com líquido, analisou-se a resposta e a relação da densidade dos líquidos. Os líquidos analisados foram água pura, ar, óleo de soja refinado, trietanolamina, etanol e glicerol. Ainda neste trabalho foram analisadas a influência da temperatura, concentração de açúcar e viscosidade no sensor.

Palavras-chave: Medição de densidade, transdutor piezoelétrico, viscosidade, concentração de açúcar, temperatura.

ABSTRACT

The continuous measurement of density is a process that ensures the quality and uniformity of the final product in industrial processes. This includes the food, petrochemical, chemical, cellulose and other industries. In the industrial automation market there are many of sensors for density reading. Those instruments use different methods such as the Coriolis effect, differential pressure, gamma rays and vibrating tuning fork. In general, greater precision implies high cost. Due to the high cost, many small companies still use the laboratory methods to obtain the density of a product, which slows the manufacturing process and reduces the quality and uniformity thereof. This project presents a sensor for reading density at lower cost. Using the concept of sensor vibration damping when in contact with liquid, the response and density relation were analyzed. The liquids analyzed were pure water, air, oil, triethanolamine, ethanol and glycerol. The influence of temperature, sugar concentration and viscosity ere also analyzed.

Key-words: Density measuring, piezoelectric transducer, viscosity, sugar concentration, temperature.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: MEDIDOR DE DENSIDADE POR EFEITO CORIOLIS.	14
FIGURA 2: MEDIDOR DE DENSIDADE POR PRESSÃO DIFERENCIAL HIDROSTÁTICA.	14
FIGURA 3: MEDIÇÃO DE DENSIDADE POR RAIOS GAMA.	15
FIGURA 4: MEDIDOR DE DENSIDADE BASEADO NO MODO DE RESSONÂNCIA POR CISALHAMENTO(TSM) OU ONDAS SUPERFICIAIS ACÍSTICAS (SAW). ..	16
FIGURA 5: MEDIDOR DENSIDADE UTILIZANDO CONCEITO DE DIAPASÃO VIBRANTE.	17
FIGURA 6: ESTRUTURA SENSOR BUZZER PIEZOELÉTRICO.	25
FIGURA 7: VIBRAÇÃO DO <i>BUZZER</i> PIEZOELÉTRICO: A) DIAFRAGMA EXPANDIDO; B) DIAFRAGMA CONTRAÍDO; C) ESTRUTURA DE VIBRAÇÃO TENSÃO ALTERNADA.	26
FIGURA 8: ESQUEMÁTICO DIAGRAMA DO PIEZOELETRICO (A) CIRCUITO EQUIVALENTE AO PIEZOELÉTRICO; (B) MODELO MECÂNICO.	26
FIGURA 9: VIGA ENGASTADA.	29
FIGURA 10: CIRCUITO COM DOIS TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS.	33
FIGURA 11: EXPERIMENTO COM CIRCUITO.	34
FIGURA 12: VIBRAÇÃO DO SENSOR: A) SENSOR EXPANDINDO, B) SENSOR CONTRAÍDO.	35
FIGURA 13: SISTEMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.	36
FIGURA 14: FLUXOGRAMA DO PROGRAMA PARA O PRIMEIRO MÉTODO.	39
FIGURA 15: FLUXOGRAMA DO PROGRAMA SEGUNDO MÉTODO.	40
FIGURA 16: FLUXOGRAMA DO SOFTWARE NO TERCEIRO MÉTODO.	42
FIGURA 17: VISCOSÍMETRO ROTATIVO ANALÓGICO Q860A24.	44
FIGURA 18: RESULTADOS DOS TRÊS MÉTODOS.	51
FIGURA 19: RESULTADOS DAS FREQUÊNCIAS PARA CINCO LÍQUIDOS.	53
FIGURA 20: EQUAÇÃO DA RETA PARA O MÉTODO 1 E 3.	54
FIGURA 21: RESULTADO DA RELAÇÃO TEMPERATURA X FREQUÊNCIA	57
FIGURA 22: DENSIDADE VERSUS TEMPERATURA DA ÁGUA.	57
FIGURA 23: VISCOSIDADE - RELAÇÃO AMPLITUDE X FREQUÊNCIA	60
FIGURA 25: FREQUÊNCIA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE.	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: DENSIDADE DA ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.	32
TABELA 2: RESULTADO DENSIDADE TRIETANOLAMINA.	32
TABELA 3: VISCOSÍMETRO ROTATIVO ANALÓGICO Q860A24.	45
TABELA 4: RESULTADO DO PRIMEIRO EXPERIMENTO.	48
TABELA 5: RESULTADO DAS EXPERIÊNCIAS PELO SEGUNDO MÉTODO.	49
TABELA 6: RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS PELO TERCEIRO MÉTODO.	50
TABELA 7: RESULTADO DO ERRO RMSE.	55
TABELA 8: COMPARANDO RESULTADO COM INSTRUMENTO EXISTENTE NO MERCADO	56
TABELA 9: VISCOSIDADE DO ÓLEO DE SOJA.	58
TABELA 10: VISCOSIDADE DO GLICEROL.....	58
TABELA 11: VISCOSIDADE DO TRIETANOLAMINA.	59
TABELA 12: RESULTADOS FREQUÊNCIAS EM DOIS SENSORES.	61

LISTA DE SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
- DAQmx – ferramenta DAQ Assistant do LABVIEW®*
- FFT - *Fast Fourier Transform* - Transformada Rápida de Fourier.
- ICUMSA - International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis – Comissão Internacional para Métodos Uniformes de Análise de Açúcar
- ISO - International Standardization Organization
- Labview® - Laboratório de Instrumentação Virtual de Engenharia em Bancada.
- Matlab® - MathWorks Inc.*
- MEM - Micro–Electro-Mechanical – Micro-Eleto-Mecânico.
- PEMC – Piezoelectric-Excited Millimeter-Sized Cantilever - Piezoelétrico em uma viga de milímetros de tamanho.
- PZT – Titanato Zirconato de Chumbo
- RMSE - *root-mean-square error*
- SI – Sistema Internacional de Unidade*
- SAW – *Surface Acoustic Waves* - Ondas Superficiais Acústicas.
- TSM - *Thickness Shear Mode* – Modo de ressonância por cisalhamento.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AC - *alternating current* – Corrente Alternada

BaTiO₃ – titanato de bário.

BX - Grau Brix.

conversor A/D - Conversor analógico digital.

conversor D/A – Conversor digital analógico.

DC - *direct current* – Corrente direta

ESTI - *Extract Single Tone Information* – extrai informação de único tom.

g – grama.

Hz – Hertz.

k – Kilo.

K - coeficiente dependendo do *spindle*.

kS/s - kilo samples per second – kilo amostra por segundo.

m- massa.

ml - milésimo do litro.

mPa.s - Milí Pascal. Segundo.

PbZrO₃ – Zirconato de Chumbo

PbTiO₃ - Titanato de Chumbo

TEA – Trietanolamina.

V – Volts.

ZnS - esfarelita

ρ - Densidade.

Ω – Ohms.

μ s - micro segundos.

η - viscosidade absoluta.

α - ângulo de deflexão.

® - marca registrada.

σ - tensão de cisalhamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2 FUNDAMENTOS.....	20
2.1 PRINCÍPIO BÁSICO DA VISCOSIDADE	22
2.2 PRINCÍPIO BÁSICO SOBRE O EFEITO PIEZOELÉTRICO	24
2.3 TRABALHOS RELACIONADOS	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 DENSIDADE- MÉTODO PICNÔMETRO	31
3.2 CIRCUITO DE MEDIÇÃO DE DENSIDADE COM TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO.....	33
3.3 AQUISIÇÕES DE DADOS	35
3.4 PLACA DE AQUISIÇÃO	37
3.5 MÉTODOS.	37
3.5.1 Primeiro Método	38
3.5.2 Segundo Método	39
3.5.3 Terceiro Método	41
3.6 TEMPERATURA X DENSIDADE	43
3.7 VISCOSIDADE – MÉTODO VISCOSÍMETRO ROTATIVO ANALÓGICO	43
3.8 APLICAÇÃO DE DENSIDADE – MEDIÇÃO DE GRAU BRIX	46
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	47
4.1 RESULTADO OBTIDO DO PRIMEIRO MÉTODO	47
4.2 RESULTADO OBTIDO DO SEGUNDO MÉTODO.....	49
4.3 RESULTADO OBTIDO DO TERCEIRO MÉTODO	50
4.4 RESULTADO FINAL PARA OS TRÊS MÉTODOS.....	51

4.5 RESULTADOS DA ANÁLISE DA TEMPERATURA VERSUS DENSIDADE.....	56
4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE	58
4.6.1 Resultado Viscosidade Instrumento Comercial Manual	58
4.6.2 Análise da Viscosidade dos Líquidos Utilizando o Sistema de Medição Projetado.....	59
4.7 RESULTADOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU BRIX DE ALGUMAS SOLUÇÕES.	61
5 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS.....	67
ANEXOS	72

1 INTRODUÇÃO

Os processos industriais requerem medições contínuas de densidade de líquidos para garantir a qualidade e a uniformidade de produtos finais. Isso inclui indústrias de alimentos, petroquímicas, químicas, papel e celulose, mineração e outras. Os instrumentos atuais de medição de densidade no mercado possuem preços elevados, isso depende principalmente dos presentes aspectos construtivos, incerteza de medição, aplicabilidade, etc. Consequentemente, empresas de pequeno porte não investem na aquisição destes instrumentos e continuam trabalhando com métodos de medição de densidade de forma manual. O fato de utilizar método manual interfere no resultado final do produto, pois as medições são feitas por amostras e, dependendo do intervalo da amostra, conhecimento do processo e recursos utilizados, pode-se ter erros nos valores esperados de seus produtos.

Atualmente existem vários instrumentos para medição da densidade como, por exemplo, a medição de densidade, utilizando o efeito Coriolis, medição por pressão, medição por raios gama e outros.

A medição de densidade por efeito Coriolis (FIGURA 1) é feita através de dois tubos paralelos que são submetidos a uma oscilação, onde ficam vibrando em sua própria frequência natural à baixa amplitude, quase imperceptível a olho nu. Quando um fluido passa por este tubo em vibração, o efeito do Coriolis manifesta-se causando uma deformação, isto é uma torção, que é captada por meio de sensores magnéticos que geram uma alternância de fase entre a frequência de vibração de entrada e saída que é proporcional à taxa de vazão. As forças geradas pelos tubos criam certa oposição à passagem do fluido em sua região de entrada e saída. A frequência ressonante de ambos os tubos se altera conforme a densidade do material e o nível de deformação dos tubos dependem da temperatura que é medida para fins de compensação. As limitações deste instrumento de medição são a faixa de temperatura de -50 a 400°C e perda de carga em uma tubulação. Pode se considerar que a medição por Coriolis é uma das mais precisas, com desvio na medição de densidade de 0,0005 g/cm³, mas o seu custo é bem elevado (NADAIS 2011).

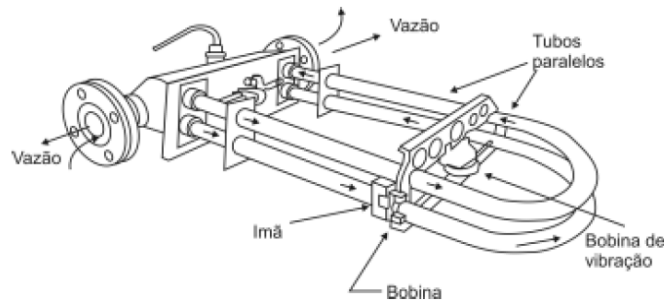


FIGURA 1: MEDIDOR DE DENSIDADE POR EFEITO CORIOLIS.
FONTE: EMERSON PROCESS (2011)

A medição de densidade por pressão diferencial hidrostática (FIGURA 2) é feita através de um diferencial de pressão entre dois pontos, separados por uma distância fixa e conhecida para calcular com precisão a densidade e concentração de um líquido. Com um sensor de pressão que se comunica com os diafragmas submersos no fluido do processo, separada por uma distancia fixa, onde é possível, através da pressão diferencial sobre o sensor saber a densidade do líquido medido. A desvantagem técnica desse método é a precisão, pois caso esteja medindo a densidade de produto viscoso o mesmo pode estar aderindo ao diafragma de medição e obtendo uma medida errônea (ALVES, 2011).



FIGURA 2: MEDIDOR DE DENSIDADE POR PRESSÃO DIFERENCIAL HIDROSTÁTICA.
FONTE: Adaptada de ALVES (2011).

A medição de densidade por raios gama (FIGURA 3) mede a dificuldade que um feixe de onda eletromagnética possui ao atravessar um fluido. O medidor

radioativo contém uma pequena fonte radioativa, geralmente de Césio 137 que emite ondas eletromagnéticas de baixo comprimento, de onda, ao atravessar a tubulação e o material, parte da energia é absorvida e a energia restante, alcança um detector (câmara de ionização). A quantidade de energia recebida no detector é inversamente proporcional à densidade do material que está sendo medido. A desvantagem de utilização dos raios gama é que precisa ter uma autorização do órgão governamental CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) para importação de fontes radioativas e sua instalação, e ainda é necessário um controle periódico da fonte radioativa.

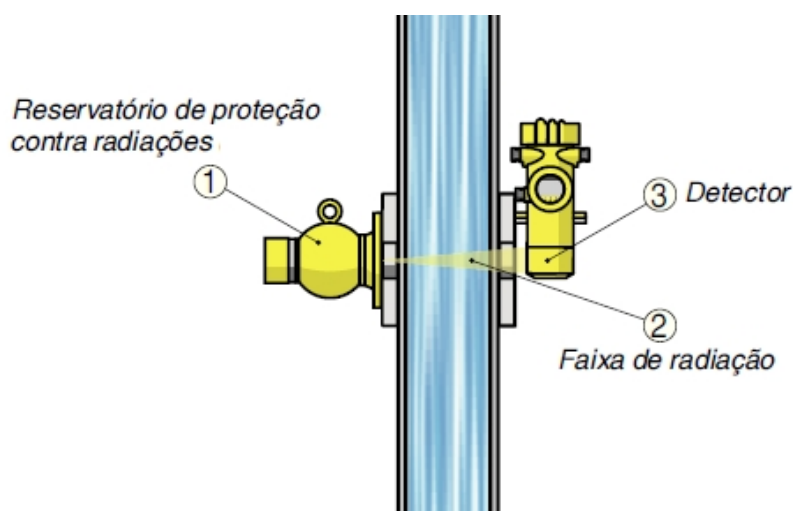


FIGURA 3: MEDIÇÃO DE DENSIDADE POR RAIOS GAMA.
FONTE: Adaptada pela VEGA (2012)

Estes instrumentos descritos estão disponíveis no mercado para aplicações industriais e dependendo da precisão da leitura da densidade, possuem preços elevados.

Por isso são estudados novos métodos de medição de densidade. Alguns destes métodos estudados utilizam em seu princípio de medição um transdutor piezoelétrico com a finalidade de gerar um sinal ultrassônico ou também como diapasão vibrante. SORAB em 1988 começou a desenvolver um mecanismo de ressonância para sensores de densidade ou viscosidade.

O estudo que utiliza o transdutor piezoelétrico para gerar um sinal ultrassônico pode ser utilizado em aplicações de medição de densidade. A utilização deste pode ser baseada em dois métodos: TSM (*Thickness Shear Mode*) que é o modo de ressonância por cisalhamento e ondas superficiais acústicas SAW

(*Surface Acoustic Waves*) (FIGURA 4). A desvantagem destes dois métodos é que estes trabalham com ressonâncias de frequência alta com frequência a partir de 1 MHz até várias centenas de MHz. (BALLANTINE, 1997)



FIGURA 4: MEDIDOR DE DENSIDADE BASEADO NO MODO DE RESSONÂNCIA POR CISALHAMENTO (TSM) OU ONDAS SUPERFICIAIS ACÚSTICAS (SAW).
FONTE: Adaptada de BALLANTINE (1997)

Com base no princípio de medição por diapásão vibrante partiu a ideia de projetar um sensor para medição de densidade. A medição de densidade por diapásão vibrante (FIGURA 5) é uma tecnologia que usa uma ou duas hastes em forma de diapásão. Este amortecimento mecânico se faz por absorção de energia de vibração pela densidade de um líquido que entra em contato com as hastes modificando a frequência de vibração natural. Com a determinação desta frequência e a devida compensação da temperatura e pressão pode-se saber a densidade do produto. Esse método de medição de densidade por diapásão vibrante pode ser implementado utilizando uma chave de nível por vibração, onde todas essas informações são enviadas para um controlador e através de cálculos pode-se saber a densidade do líquido. Este processo, dependendo da aplicação pode não ser bem precisa ou até pode não funcionar. (ZHANG *et al*, 2001).

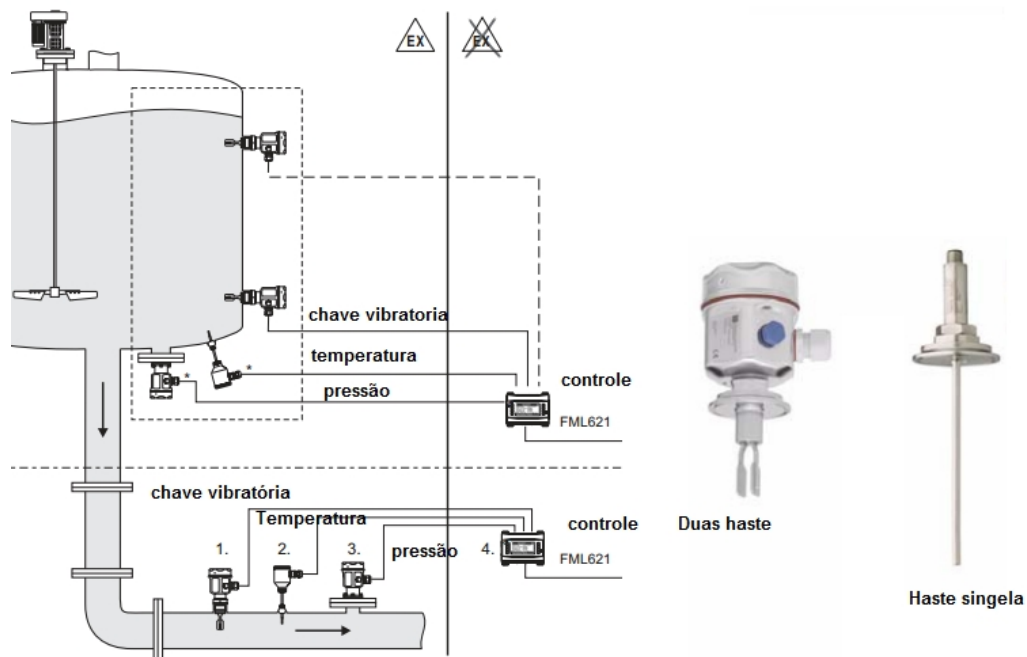


FIGURA 5: MEDIDOR DENSIDADE UTILIZANDO CONCEITO DE DIAPÁSÃO VIBRANTE.
 FONTE: Adaptada de ENDRESS+HAUSER (2012)

1.1 MOTIVAÇÃO

Hoje nas indústrias, alguns processos dependem de medição precisa e confiável de densidade em líquidos, pois alguns processos envolvendo um meio líquido requerem a combinação de vários ingredientes, que através do monitoramento da densidade, permitem que os operadores consigam determinar a quantidade exata do ingrediente a ser adicionado obtendo assim uma uniformidade e qualidade no produto final.

Um exemplo de aplicação de sensores de densidade em fluidos é a medição da densidade para monitorar o óleo do motor do automóvel, que sofre alterações físicas e químicas que degradam o desempenho do motor ao longo do tempo. O controle da densidade é de grande interesse para a indústria automobilística, pois pode avisar ao motorista sobre a necessidade de troca do óleo (KANAZAWA, 1985).

Outra aplicação, utilizando o controle da densidade, poder ser apresentado em uma indústria de alimentos. Como por exemplo, aplicação que necessita da medição constante do grau Brix, que está relacionada com a densidade do produto. O grau Brix é a porcentagem em massa de sacarose presente em uma solução,

essa medida influencia no processo final do produto e é fundamental para a eficiência de custo e qualidade do produto. O processo para controle do grau Brix utiliza-se de procedimento de análise laboratorial caro e demorado. O intervalo de tempo entre a tomada da amostra e a obtenção dos resultados analisados resulta em desperdício e má qualidade do produto.

A leitura de densidade oferece em tempo real uma alternativa de custo eficaz e proporciona uma uniformidade e qualidade ao produto, permitindo assim que os ajustes no processo sejam imediatos, melhorando o controle do processo e reduzindo os desperdícios de material.

Os métodos utilizados hoje fornecem resultados precisos e confiáveis, mas eles muitas vezes exigem dispositivos complexos, volumosos e caros. Assim, métodos mais simples e baratos que fornecem resultados precisos e permitem medições em campo ainda são necessários.

Utilizando como base o método de medição de densidade por diapasão vibrante e observando sua relação de funcionamento de vibração proporcional à densidade, partiu-se à motivação de estudar o funcionamento de mecanismo vibrante que, através do seu amortecimento mecânico em contato com líquidos, fosse capaz de medir a densidade do meio. O mecanismo vibrante utilizado foi um transdutor piezelétrico baseado em pesquisas anteriormente publicadas.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo do presente trabalho é projetar e analisar um sistema para leitura de densidade de líquidos, utilizando um transdutor piezoelétrico de baixo custo. Os objetivos específicos podem ser relacionados:

- a) Desenvolver um sensor de medição de densidade capaz de medir a densidade de líquidos através de um transdutor piezoelétrico.
- b) Desenvolver um sistema de medição capaz de analisar dados de leitura de densidade para comparação e análise dos resultados;
- c) Construir um protótipo para execução de testes;
- d) Realizar experimentos com diversos tipos de líquidos com densidades diferentes;

- e) Validar os resultados obtidos com o sistema de medição projetado com valores reais de densidade de diferentes líquidos

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação contém cinco capítulos mais referências bibliográficas e anexos. No capítulo 2 são apresentados os fundamentos sobre densidade, viscosidade, sensores piezoelétricos e revisões bibliográficas para o entendimento da dissertação. O capítulo 3 apresenta o circuito projetado para obter a densidade do líquido utilizando o sensor piezoelétrico e como foram realizados os experimentos. Junto, apresenta-se um método de leitura manual de densidade e as três formas de medir densidade pelo sistema projetado, suas interferências e relações de temperatura e densidade. Através do mesmo sistema de medição de densidade, estuda-se o comportamento do sensor frente à viscosidade dos líquidos. Será descrita uma forma de medição de viscosidade manual e é comparado seu resultado com algumas características do sistema de medição projetado. No capítulo 4 é possível observar os resultados dos experimentos do capítulo anterior, são apresentadas as planilhas dos resultados obtidos nos métodos utilizados para medição de densidade pelo sistema projetado. No capítulo 5 é apresentada uma breve sumarização do trabalho além da conclusão dos resultados obtidos. Neste capítulo são relacionados alguns itens para trabalhos futuros. Encerrando o documento, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para desenvolver todo o projeto e por fim anexos, que apresentam as telas do *Labview*[®] utilizado, *scripts* do *Matlab* e algumas respostas dos experimentos.

2 FUNDAMENTOS

Cada substância possui propriedades físicas que correspondem à densidade e a viscosidade.

A densidade absoluta ou massa específica de uma substância qualquer de massa m e volume V é definida por (POTTER E WIGGERT, 2002);

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

ou seja, é a razão entre a massa de um corpo e seu volume que ocupa no espaço.

A densidade de um líquido, segundo o Sistema Internacional de Unidade (SI) é expressa em quilograma por metro cúbico (kg/m^3). Entretanto, é mais comumente utilizada em unidade de grama por centímetro cúbico (g/cm^3) ou grama por mililitro (g/ml). A densidade absoluta é uma propriedade específica, isto é, cada substância pura tem uma densidade própria, que a identifica e a diferencia das outras substâncias.

A densidade relativa de um material é a relação entre a sua densidade absoluta e a densidade absoluta de uma substância estabelecida como padrão, normalmente a água, ou seja, corresponde à razão entre as densidades absolutas de duas substâncias.

$$\frac{\rho_{\text{solução}}}{\rho_{\text{água}}} = \frac{\frac{m_{\text{solução}}}{V}}{\frac{m_{\text{água}}}{V}} = \frac{m_{\text{solução}}}{m_{\text{água}}} \quad (2)$$

Portanto, densidade da solução é:

$$\rho_{\text{solução}} = \frac{m_{\text{solução}}}{m_{\text{água}}} \times \rho_{\text{água}} \quad (3)$$

A densidade depende também da temperatura, pressão e principalmente, da natureza da sua estrutura cristalina, pois dois materiais podem ter a mesma

composição química, mas estruturas cristalinas diferentes, o que difere também a densidade do material.

Quando aumenta-se a temperatura de um determinado líquido, tem-se um aumento do volume fixo deste, pois haverá a dilatação ocasionada pela separação dos átomos e moléculas, considerando que a densidade é a relação da massa pelo volume, pode se concluir que a densidade do líquido diminui. Ao contrário, ao se diminuir a temperatura de um determinado líquido, tem-se uma diminuição deste volume fixo, o que faz com que a densidade aumente.

Uma das aplicações práticas da medição de densidade em indústrias é sua utilização para medição de concentração. Como há uma variedade de aplicações de medição de concentração, foram criadas algumas escalas baseadas na densidade para determinação de concentrações específicas, uma delas é a escala Brix que relaciona a quantidade de sacarose contida em um meio líquido.

No século 19, o cientista alemão Adolf F. Brix (1798-1870) desenvolveu uma escala de hidrômetro baseada na densidade para medir diretamente a porcentagem de açúcar dissolvido em uma solução. A escala, a qual é numericamente igual à porcentagem de açúcar dissolvido em uma solução, é agora conhecida como a escala Brix, ou graus Brix ($^{\circ}\text{Bx}$). Deste modo, uma solução que possui 25 graus Brix ou 25°BX , pode-se dizer que existem 25 g de açúcar e 75 g de água por 100 g de solução (NÓBREGA et al., 2010).

A escala Brix é uma versão corrigida de uma escala anterior com relação ao teor de açúcar, a escala de Balling que foi introduzida pelo químico alemão Karl Balling em 1843 (BALL, 2006). A escala Balling é baseada na porcentagem de açúcar como o Brix, ou seja, 1 grau Balling é igual a 1% de açúcar. A tabela original de Balling continha um erro numérico que foi corrigido por um cientista alemão chamado Plato e, mais tarde, por Brix. Essencialmente, as três escalas são as mesmas e são utilizadas em diferentes regiões do mundo. Indústrias cervejeiras do continente europeu utilizam o termo escala de Plato, enquanto as indústrias do vinho, açúcar e suco utilizam Brix (OLIVEIRA et al., 2010).

Muitas empresas alimentícias utilizam sensores de densidade para obter o grau Brix. O mesmo pode ser útil também na colheita de frutos, pois é a quantidade de açúcar que indica se o fruto está ou não maduro (VIÉGAS, 1991).

O grau Brix e a temperatura possuem uma relação direta com a densidade do produto, quanto maior a porcentagem de açúcar em uma solução, maior é a

densidade. O quadro 1 apresenta uma tabela retirada do website da ICUMSA (*International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis* – Comissão Internacional para Métodos Uniformes de Análise de Açúcar), onde apresenta a relação grau Brix versus temperatura, obtendo-se a densidade da solução (EMMERICH, 1990).

Grade Brix (densidade da solução de sacarose hidratado em kg/m ³)								
°Brix	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
0	999.70	998.20	995.64	992.21	988.03	983.19	977.76	971.78
5	1019.56	1017.79	1015.03	1011.44	1007.14	1002.20	996.70	989.65
10	1040.15	1038.10	1035.13	1031.38	1026.96	1021.93	1016.34	1010.23
15	1061.48	1059.15	1055.97	1052.08	1047.51	1042.39	1036.72	1030.55
20	1083.58	1080.97	1077.58	1073.50	1068.83	1063.60	1057.85	1051.63
25	1106.47	1103.59	1099.98	1095.74	1090.94	1085.61	1079.78	1073.50
30	1130.19	1127.03	1123.20	1118.80	1113.86	1108.44	1102.54	1096.21
35	1154.76	1151.33	1147.58	1142.71	1137.65	1132.13	1126.16	1119.79
40	1180.22	1176.51	1172.25	1167.52	1162.33	1156.71	1150.68	1144.27
45	1206.58	1202.61	1198.15	1193.25	1187.94	1182.23	1176.14	1169.70
50	1233.87	1229.64	1224.98	1219.93	1214.50	1208.70	1202.56	1196.11
55	1262.11	1257.64	1252.79	1247.59	1242.05	1236.18	1229.98	1223.53
60	1291.31	1286.61	1281.59	1276.25	1270.61	1264.67	1258.45	1251.88
65	1321.46	1316.56	1311.38	1305.93	1300.21	1294.21	1287.96	1281.52

QUADRO 1: DENSIDADE DO LÍQUIDO COM RELAÇÃO TEMPERATURA X GRAU BRIX.
FONTE: Adaptada de EMMERICH (1990)

2.1 PRINCÍPIO BÁSICO DA VISCOSIDADE

A viscosidade de líquidos deve ser levada em consideração nos estudos de implementação do sistema de medição de densidade com sensores piezoelétricos, porque a viscosidade do líquido em medição pode interferir neste tipo de sensor aplicado.

A primeira característica que deve ser levada em conta quando estuda-se a viscosidade de um líquido é, se o fluido em questão é newtoniano e não newtoniano. Os fluidos newtonianos possuem uma linearidade no seu comportamento, possuem uma viscosidade dinâmica, que garante um coeficiente de proporcionalidade entre tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade, desde que se mantenha a

pressão e a temperatura constantes do elemento a ser medido, que influem diretamente na medida da viscosidade do mesmo. Ou seja, os fluidos newtonianos são diretamente proporcionais à taxa de deformação ou taxa de cisalhamento. Nos fluidos, com o aumento da temperatura a viscosidade diminui; isto se deve porque há um espaçamento entre as moléculas fazendo com que ocorra a diminuição da atração molecular e com isso a redução da viscosidade dos mesmos. Os fluidos não-newtonianos não possuem esta proporcionalidade entre a taxa de tensão de cisalhamento e o gradiente da velocidade.

A lei da viscosidade de Newton diz que a relação entre a tensão de cisalhamento σ (força de cisalhamento x área) é proporcional ao gradiente de velocidade (V) e definida através de uma relação linear, sendo a constante de proporcionalidade η , a viscosidade do fluido. Assim, todos os fluidos que seguem este comportamento são denominados fluidos newtonianos (AKCELRUD, 2007).

$$\sigma = \eta \frac{\partial V}{\partial y} \quad (4)$$

Segundo Eyring *et al.* (1941), a viscosidade está relacionada à barreira potencial que uma molécula terá que vencer a fim de saltar as posições desocupadas adjacentes formadas por moléculas intercaladas, também definidas como energia livre de ativação. A viscosidade está relacionada com a força que tende a se opor a esse movimento, sendo uma medida de fricção interna do fluido.

A viscosidade mede a resistência de um fluido ao escoamento. Assim, quanto mais viscoso for o fluido, mais resistividade ao escoamento ele oferecerá. É uma propriedade termodinâmica que depende da temperatura e pressão. É determinada de acordo com a norma NBR ISO 2909 da ABNT (2002) como procedimento normalizado, no qual é medido o tempo que um fluido demora a percorrer um tubo capilar.

2.2 PRINCÍPIO BÁSICO SOBRE O EFEITO PIEZOELÉTRICO

O transdutor piezoelétrico é um dispositivo que utiliza o efeito piezoelétrico para medir pressão, aceleração de tensão ou força, convertendo-os a uma carga elétrica.

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 por Pierre e Jacques Curie, durante seus sistemáticos estudos do efeito da pressão na geração de carga elétrica pelos cristais de quartzo, esfarelita (ZnS) e turmalina. Desde então têm motivado inúmeras investigações para o desenvolvimento de sistemas transdutores eletromecânicos (PIETTE et al, 1987).

O efeito consiste basicamente na conversão de energia mecânica em elétrica (do grego “piezo” é igual à pressão). Posteriormente, em 1881, por análise termodinâmica, Lippman previu a existência do “efeito piezoelétrico inverso”, que consiste no aparecimento de uma deformação do material quando submetido a um campo elétrico (IKEDA,1990).

A primeira aplicação tecnológica de um elemento piezoelétrico pode ser atribuída a Langevin (1921), que desenvolveu um sonar utilizando o quartzo como elemento piezoelétrico. O descobrimento que as cerâmicas ferroelétricas de titanato de bário (BaTiO_3) polarizadas apresentam o efeito piezoelétrico, marcou o início da geração das piezocerâmicas por Roberts (1947).

Como mencionado anteriormente, embora as primeiras aplicações de materiais piezoelétricos tenham sido realizadas utilizando cristais de quartzo, o maior crescimento do número de aplicações ocorreu a partir do descobrimento de uma solução sólida PbZrO_3 (Zirconato de Chumbo) e PbTiO_3 (Titanato de Chumbo), por Jaffe nos anos 50 que resultaram na obtenção dos piezoelétricos cerâmicos baseados em titanato zirconato de chumbo (PZT) (JAFJE et al.,1971).

O material piezoelétrico apresenta o fenômeno de gerar uma carga elétrica, quando sujeito a uma tensão mecânica ou uma pressão dinâmica. No caso inverso quando sujeito a uma carga elétrica, ocorrendo uma deformação mecânica.

Um elemento piezoelétrico de cerâmica é um corpo sintetizado de muitos cristais (Policristalinos – materiais cerâmicos). O mesmo apresenta algumas vantagens frente aos cristais de quartzo: como o processo de obtenção mais barato,

a possibilidade de ser preparado em grandes variedades de composições, o que permite controlar ou alterar suas propriedades físicas, e a possibilidade de serem produzidos numa maior variedade de geometrias.

Os materiais piezocerâmicos pertencem à classe dos materiais ferroelétricos que caracterizam-se por apresentarem, em um determinado intervalo de temperatura, polarização espontânea que pode ser reorientada pela aplicação de um campo elétrico (inferior ao campo de ruptura).

Neste trabalho foi utilizado um *buzzer* piezoelétrico de fácil aquisição no mercado e baixo custo. O disco fino é um componente eletrônico comercialmente vendido para empresas de componentes ou equipamentos eletrônicos, conhecido como *buzzer* piezoelétrico. Este possui uma estrutura fina em forma de disco com três elementos fundamentais: a membrana de piezocerâmica, a folha de metal elástico de liga de níquel e a última parte composta recoberta com o diâmetro de 24 mm de uma membrana de solução em gel usada como um eletrodo. O disco, corresponde a uma estrutura fina que possui uma membrana piezoelétrica de diâmetro de 24 mm aplicada a uma folha de metal de 35 mm de diâmetro. A espessura da folha de metal é de 0,15 mm sendo a espessura total de 0,35 mm (FIGURA 6). (MURATTA, 2012)

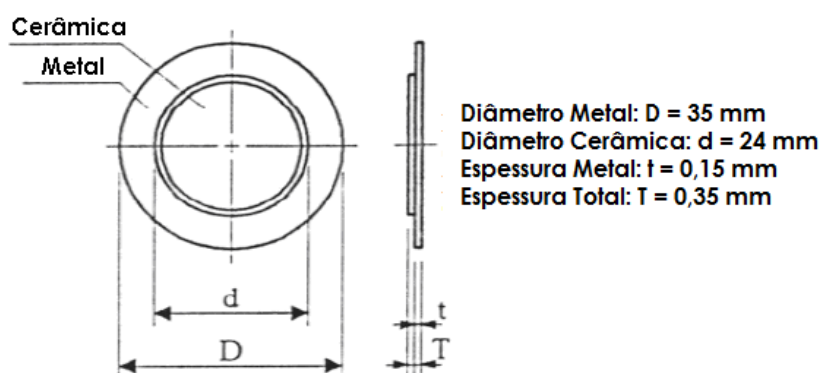


FIGURA 6: ESTRUTURA SENSOR BUZZER PIEZOELÉTRICO.
FONTE: Adaptada de WEN et al. (2003)

Basicamente, o *buzzer* piezoelétrico poder ser chamado de um diafragma piezoelétrico. Aplicando tensão elétrica contínua entre os eletrodos de um diafragma piezoelétrico, faz-se a distorção mecânica devido ao efeito piezoelétrico. A distorção para elementos piezoelétrico ocorre em todas as direções dependendo da frequência de excitação, porém preferencialmente para este elemento, a distorção

se destaca numa direção radial. E o diafragma piezoelétrico curva-se para o sentido mostrado na FIGURA 7 (a). A placa de metal ligada ao elemento piezoelétrico não se expande. Por outro lado, quando o elemento piezoelétrico contrai, há deformações do diafragma piezoelétrico na direção representada na FIGURA 7 (b). Assim quando a tensão alternada é aplicada ao diafragma à curvatura representada na FIGURA 7 (a) e (b) é repetida, devido à contração e expansão do diafragma, como mostra a FIGURA 7 (c). (MURATTA, 2012)

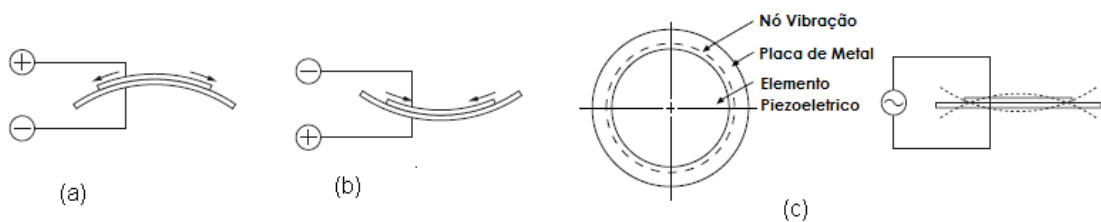


FIGURA 7: VIBRAÇÃO DO BUZZER PIEZOELÉTRICO: A) DIAFRAGMA EXPANDIDO; B) DIAFRAGMA CONTRAÍDO; C) ESTRUTURA DE VIBRAÇÃO TENSÃO ALTERNADA. FONTE: Adaptada de MURATTA (2012)

A representação mais simples do comportamento de um ressonador piezoelétrico é dada pelo circuito equivalente como é mostrado na FIGURA 8 (a) e seu modelo mecânico equivalente pode ser representado conforme a FIGURA 8 (b). A ressonância mecânica do elemento é indicada por R , L , C , onde L e C determinam a frequência de ressonância. (MURAMATSU *et al.*, 1988)

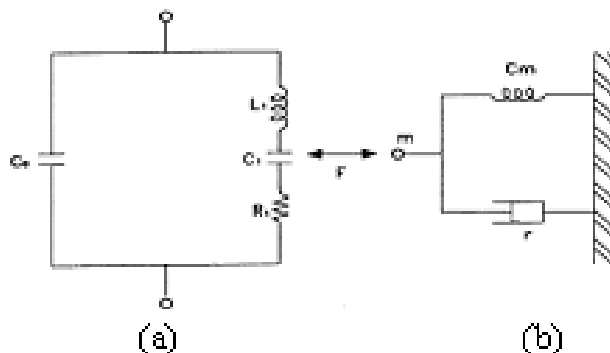


FIGURA 8: ESQUEMÁTICO DIAGRAMA DO PIEZOELETRICO (A) CIRCUITO EQUIVALENTE AO PIEZOELÉTRICO; (B) MODELO MECÂNICO. FONTE: MURAMATSU *et al.* (1988)

A equação de um circuito de oscilação elétrica representado por circuito RLC em série é apresentado por (MURAMATSU *et al.*, 1988):

$$L_1 \frac{d^2 q}{dt^2} + R_1 \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C_1} q = V \quad (5)$$

Onde q é a carga e V é a tensão aplicada.

Para o transdutor piezoelétrico, o modelo elétrico pode ser representado em um modelo mecânico através da utilização do fator de acoplamento eletromecânico k como uma analogia eletromecânica, ou seja, a eficiência piezoelétrica de um material é medida através da razão entre a força mecânica aplicada e a força elétrica produzida. A equação para o modelo mecânico mostrado na FIGURA 8 b é dada como (MURAMATSU *et al.*, 1988):

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + \frac{1}{C_m} x = F \therefore (F = kV) \quad (6)$$

Onde x é o deslocamento, m é a massa, r é o coeficiente de atrito e Cm é a elasticidade (MURAMATSU *et al.*, 1988).

Comparando-se as equação 5 e 6 temos:

$$L_1 = \frac{m}{k^2} \quad (7)$$

$$C_1 = C_m k^2 \quad (8)$$

$$R_1 = \frac{r}{k^2} \quad (9)$$

As equações 7, 8 e 9 mostram a correspondência aos fatores indutância – massa, capacitância - elasticidade e resistência - atrito, ou seja, a resistência ressonante R1 reflete a resistência mecânica do transdutor piezoelétrico, a capacitância C1 reflete a elasticidade do mesmo e a indutância L1 reflete a massa total do transdutor piezoelétrico e o líquido que está em contato com ele. (CHANG *et al.*, 2000)

A resistência ressonante do transdutor piezoelétrico, é a resistência do circuito elétrico equivalente, que em contato com líquido pode ser representado pela seguinte equação (MURAMATSU *et al.*, 1988);

$$R_1 = (2\pi f \rho_L \eta)^{1/2} A / k^2 \quad (10)$$

Onde f é frequência ressonante, ρ_L corresponde à densidade do líquido, η viscosidade do líquido e A é área da superfície. Ou seja, se ocorrer variação na resistência há uma variação na frequência. Considerando a equação 9, esta resistência está ligada ao atrito do líquido do transdutor piezoelétrico.

Utilizando o circuito equivalente, a frequência de ressonância do transdutor piezoelétrico é:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad (11)$$

Esta equação implica que a mudança da frequência de ressonância inclui as informações da mudança de massa e alteração da elasticidade sobre o transdutor piezoelétrico. Assim pode-se concluir que L_1 e C_1 são alteradas se ocorrer variação na carga pela massa na superfície ou na elasticidade do transdutor piezoelétrico (Chang *et al.*, 2000).

Martin *et al.* (1994) verificaram que, para um líquido Newtoniano a mudança em ambos os parâmetros R_1 e L_1 é aproximadamente proporcional à raiz quadrada da viscosidade η e densidade ρ de fluido.

$$\Delta R \approx \Delta L \approx \sqrt{\eta \rho} \quad (12)$$

Devido à pequena mudança relativa $\Delta L/L_1$, pode-se também considerar a mudança $\Delta F/F_0$ como sendo aproximadamente proporcional a $\sqrt{\eta \rho}$, onde a equação 12 é a frequência de ressonância em série.

2.3 TRABALHOS RELACIONADOS

Segundo Waszczuk et al. (2011), a medição da frequência de ressonância e a resistência elétrica de um diapasão de quartzo permitem determinar a densidade do líquido quando imerso no mesmo. Mas este líquido deve ter características não condutoras de eletricidade para que seja possível tal medição.

Um novo sensor estudado por Rezazadeh et al. (2010) mostrou que o fluido tem o efeito de inércia e dissipação mecânica sobre a resposta do sensor. Consequentemente, a viscosidade e densidade de um fluido podem ser medidas por detecção de alterações da ressonância da frequência e da amplitude. O sensor conhecido como micro-eleto-mecânico (*MEM - micro-electro-mechanical*) consiste de uma microviga com uma camada piezoelétrica nas superfícies superior e inferior desta. A extremidade está ligada a uma micro placa livre, onde duas forças externas agem sobre a placa de detecção obtendo as variações da frequência e amplitude, determinando assim a densidade e viscosidade do fluido.

Sensores de viga engastada (FIGURA 9) têm sido utilizados na medição de densidade (Goubaidoulline *et al.*, 2005; McLoughlin *et al.*, 2006 e Rijal e Mutharasan, 2006) e viscosidade (Agoston *et al.*, 2005; Ahmed *et al.*, 2001 e Bergaud e Nicu 2000). Nos líquidos, os sensores de viga engastada são significativamente atenuados devido ao cisalhamento viscoso. Isto é, em parte, devido ao tamanho pequeno de sensores microvigas.

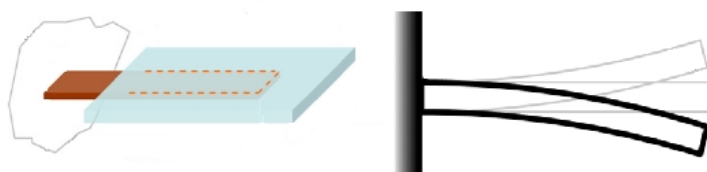


FIGURA 9: VIGA ENGASTADA.
FONTE: Adaptada de LAKSHMANAN (2011)

Wilson et al. (2007) trabalhou com a variação da tensão de excitação do piezoelétrico em uma viga de milímetros de tamanho (*PEMC - piezoelectric-excited millimeter-sized cantilever*), imersas em vários líquidos onde determinam os valores de densidade e viscosidade através do monitoramento do deslocamento do pico de ressonância e mudança nos fatores de qualidade.

Agoston et al. (2005), utilizando um micro ressonador acústico de quartzo e conduzindo com uma tensão alternada, verificaram que, quando o mesmo em contato com o líquido viscoso fazia com que os parâmetros elétricos do ressonador variassem conforme a densidade e viscosidade do líquido. A impedância é alterada devido a uma inércia maior associada com o líquido em movimento na superfície do sensor, o que leva à mudança na frequência de ressonância e perda da energia no fluido viscoso.

Martin et. al. (1994), através de experimentos realizados com líquidos utilizando um sensor ressonador por cisalhamento (TSM –Thickness Shear Mode), pode mostrar um deslocamento adicional do sinal de resposta proporcional à densidade do fluido. Isto deve-se à rugosidade da superfície do sensor em contato com o líquido, que resulta em um aumento da inércia eficaz da superfície oscilante de quartzo.

Segundo McClelland and Rorrer (2011), utilizando um dispositivo micro acústico conhecido com o modo de corte em espessura (TSM), a viscosidade de um fluido tem um efeito de amortecimento sobre a oscilação do sensor micro acústico, reduzindo assim a amplitude do sinal de resposta. Através de experimentos, mostrou-se que a amplitude do sinal de resposta do sensor micro acústico é proporcional à viscosidade do fluido.

Sensores que se utilizam das propriedades piezoelétricas são usados constantemente como sensores de densidade, por serem sensores relativamente baratos e com funcionalidades tanto mecânica como elétrica.

Seguindo o conceito que um elemento piezoelétrico é utilizado para leitura de densidade de líquidos, este trabalho propõe um sensor de baixo custo e fácil aquisição. Prevê-se uma configuração utilizando dois sensores piezoelétricos que não estejam no formato de um diapasão, conforme visto em trabalhos anteriores. Para isso foram feitos vários experimentos para validar sua aplicação e resultados obtidos em suas medições em líquidos com densidades diferentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para iniciar alguns experimentos, foram escolhidas algumas soluções de diferentes densidades e viscosidades para realizar medidas experimentais e analisar a resposta com o sistema de medição construído. As soluções utilizadas para os experimentos foram: água pura, óleo de soja, etanol, trietanolamina (TEA) e glicerol.

Algumas das soluções escolhidas eram soluções mistas nas quais não se poderia afirmar qual era a densidade do líquido apenas pelo tipo de solução. Então foi necessário aferir a densidade destes líquidos para começar as análises. Para isso, foi utilizado o método do picnômetro que é um método manual recomendado pela NBR ISO 8304 da ABNT (1983) e utilizado em alguns laboratórios de indústrias de pequeno porte para medir a densidade relativa dos líquidos.

Os líquidos analisados foram considerados em temperatura ambiente, ou seja, temperaturas entre 22°C a 26°C, não foi considerada nos métodos de aferição a interferência da temperatura com relação à densidade. Foi realizado apenas um estudo com a água para demonstrar a interferência da temperatura com relação à densidade.

3.1 DENSIDADE- MÉTODO PICNÔMETRO

Para o procedimento de medição foram necessários os seguintes materiais: balança analítica de precisão 0,1 g, picnômetro de 25 ml e termômetro de álcool. O picnômetro corresponde a um pequeno frasco de vidro construído cuidadosamente de forma que o volume, no caso 25 ml do fluido, seja invariável, ou seja, possui baixo coeficiente de dilatação. Para a densidade relativa de líquido pelo método do picnômetro (volume constante), inicialmente deve-se obter o peso do mesmo através de uma balança analítica com precisão 0,1g, pois a massa de qualquer solução corresponde ao peso da solução dentro do picnômetro menos o seu peso. Com o peso definido, é necessário determinar a temperatura da água destilada e sua massa. Então deve-se preencher o picnômetro com água destilada para obter a sua massa. Após isso, ele é pesado e obtêm-se a massa da água destilada através do

peso do picnômetro cheio de água destilada menos o seu peso vazio. Tendo a massa, deve se pesar o picnômetro com a solução e encontrar a massa da solução pelo mesmo procedimento realizado com a água destilada. Com isso é possível definir a massa da água e a massa da solução.

Para definir a densidade da água destilada, basta consultar a TABELA 1 através da temperatura da mesma, medida inicialmente no experimento. Através da equação 3 obtém-se a densidade da solução.

TABELA 1: DENSIDADE DA ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.

Temp (°C)	Densidade (g/ml)	Temp (°C)	Densidade (g/ml)
21	0,998	31	0,995
22	0,997	32	0,995
23	0,997	33	0,994
24	0,997	34	0,994
25	0,997	35	0,994
26	0,996	36	0,993
27	0,996	37	0,993
28	0,996	38	0,993
29	0,996	39	0,992
30	0,995	40	0,992

FONTE: Hempe *et al.* (1988)

O resultado da densidade obtida pelo método manual para a trietanolamina foi de 1,117 g/ml. A TABELA 2 apresenta os resultados obtidos no experimento. A densidade da água foi considerada 0,997 g/ml segundo a TABELA 1, pois a temperatura da água no experimento era de 22°C.

TABELA 2: RESULTADO DENSIDADE TRIETANOLAMINA.

	Valor Medido
Peso do Picnômetro (g)	25,126
Peso do Picnômetro com Água (g)	53,431
Massa da Água (g)	28,305
Peso do Picnômetro com Líquido (g)	56,825
Massa do Líquido (g)	31,699
Densidade do Líquido (g/ml)	1,117

Com a utilização deste método de medição manual é possível obter uma base de comparação das medições que serão feitas pelo sistema de medição de densidade que foi projetado.

3.2 CIRCUITO DE MEDIÇÃO DE DENSIDADE COM TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO

Para a realização dos experimentos, foi projetado um circuito com dois transdutores piezoelétricos conforme mostra a FIGURA 10.

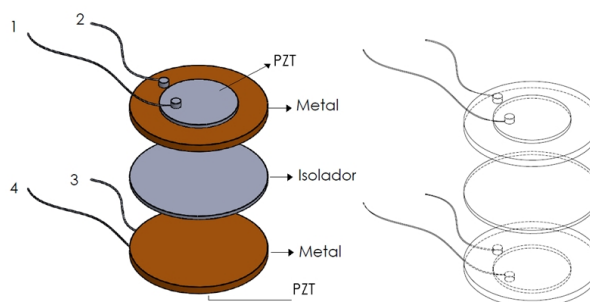


FIGURA 10: CIRCUITO COM DOIS TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS.

O circuito projetado para o experimento é composto de dois transdutores piezoelétricos que são colados um ao outro com um isolamento entre eles, garantindo que o primeiro transdutor que receberá o sinal esteja eletricamente isolado do segundo transdutor que irá responder ao sinal de vibração. Este isolamento entre os dois transdutores corresponde à cola epóxi.

Aplicando-se uma tensão alternada no primeiro transdutor, ela faz com que o mesmo produza ondas sonoras (mecânicas) que afetam o segundo transdutor.

O segundo transdutor funciona como um microfone, convertendo essas ondas mecânicas num sinal elétrico que pode ser lido pelo software LABVIEW® para obter a frequência de atuação. Este conjunto de dois transdutores apresenta uma frequência de ressonância que depende da densidade (e viscosidade) do líquido no qual está imerso.

A FIGURA 11 representa o circuito utilizado nos três métodos para a leitura da densidade, quando imerso em um líquido.

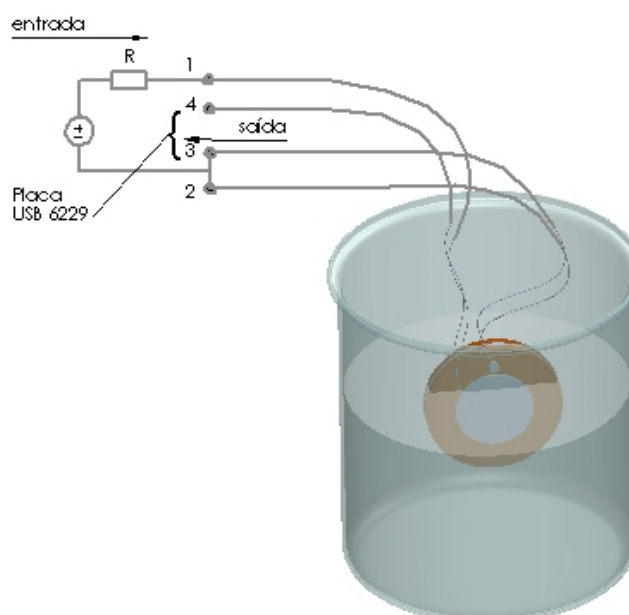


FIGURA 11: EXPERIMENTO COM CIRCUITO.

Foram construídos vários sensores, ou seja, transdutores colados um ao outro de forma que estivesse isolado eletricamente, onde o meio que o isolava não interferisse no resultado final. O método utilizado para colar um transdutor ao outro não deveria afetar a vibração do mesmo, ou seja, não poderia amortecê-lo e deveria isolar o contato elétrico. O sensor que apresentou a melhor resposta foi o transdutor piezoelétrico colado com epóxi e os lados dos transdutores estavam colados do mesmo lado do metal, os transdutores piezoelétrico apresentam a face do PZT (piezoelétrico) voltada para o líquido e a parte colada possuía o mesmo potencial. Então o primeiro transdutor piezoelétrico é energizado com um sinal elétrico que faz com que o mesmo vibre mecanicamente como mostra a FIGURA 12. Considerando que o segundo transdutor piezoelétrico está em contato com o primeiro piezoelétrico, porém, isolados eletricamente, este segundo transdutor têm a função de receber a vibração mecânica e transformá-la em um sinal elétrico como mostra a FIGURA 12. Na entrada do sinal foi colocado um resistor de 100Ω (Ohms) para evitar um curto circuito com o transdutor e a fonte.

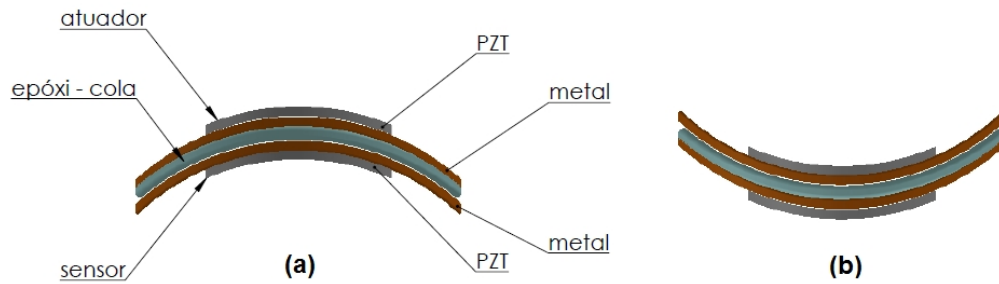


FIGURA 12: VIBRAÇÃO DO SENSOR: A) SENSOR EXPANDINDO, B) SENSOR CONTRAINDO.

Para a análise das informações de medição de densidade através do circuito projetado na FIGURA 11, foi necessário criar um sistema de medição de densidade, composto por *hardware* e *software* para aquisição e tratamento das informações. A seguir são descritas as ferramentas utilizadas na composição do sistema de medição de densidade.

3.3 AQUISIÇÕES DE DADOS

O Labview[®] (Laboratório de Instrumentação Virtual de Engenharia em Bancada) utiliza uma linguagem de programação gráfica, a linguagem G, que utiliza um fluxograma como símbolos, ao invés de linhas de texto estruturado para desenvolver as aplicações. O software, produto da *National Instruments*, é dividido em duas partes: o diagrama de blocos (programa propriamente dito) e o painel frontal (interface gráfica com o usuário). O *software* apresenta-se como uma ferramenta versátil, pois a mesma possibilita ao usuário trabalhar em diversas plataformas, como por exemplo: ambiente *Windows*, *Unix*, *Linux* e *Macintosh*, não havendo incompatibilidade nos recursos. Ele permite utilizar ferramentas matemáticas como o programa *Matlab*[®] (*MathWorks Inc.*) para implementação de algoritmos matemáticos no ambiente gráfico através da ferramenta *Math Script Node*. Possui a funcionalidade em aplicações de simulação, aquisição de dados em tempo real e controle, com isso é possível analisar e visualizar dados extraindo a informação final do sinal (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

O Labview[®] contém uma biblioteca de ferramentas para processamento de sinais, análise e visualizações. As funções *Buneman Frequency Estimator* e *Extract*

Single Tone Information foram utilizadas para análise de frequência no presente trabalho.

Buneman Frequency Estimator utiliza a fórmula de Buneman, representado pela equação 13, que calcula a frequência de uma onda senoidal, quando o número total de amostras não são divisíveis pelo período da amostra (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

O algoritmo *Buneman* identifica dois valores máximos $F_b(X)$ e $F_{b+1}(X)$ correspondente à transformada de Fourier do sinal X , considerando que b corresponde o índice onde ocorre o valor máximo, $b+1$ é o segundo valor máximo e n corresponde ao número total de amostra do sinal de entrada. Para uma dada Δf e uma frequência desconhecida f , que é calculada por (SORAN *et al.*, 2007):

$$f = b * \Delta f + \frac{n}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\left(\sin \frac{\pi}{n} \right)}{\cos \frac{\pi}{n} + \frac{|F_b(X)|}{|F_{b+1}(X)|}} \right] \quad (13)$$

Ou seja, o algoritmo Buneman usa as informações sobre uma vizinhança onde a frequência f é encontrada.

A função *Extract Single Tone Information* calcula a frequência, a amplitude e a fase do sinal. Para obter estas informações utiliza internamente a transformada de Fourier (Kiritsis *et al.*, 2003).

A aquisição de dados é um processo de obter ou gerar informação de maneira automatizada a partir de fontes de medições analógicas tais como sensores. Sistemas de aquisição de dados usam, normalmente, uma combinação de hardware e software para analisar e visualizar os dados (FIGURA 13).



FIGURA 13: SISTEMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.

3.4 PLACA DE AQUISIÇÃO

O módulo utilizado no projeto é o NI USB-6229, um módulo desenvolvido pela *National Instruments* para laboratórios de pesquisa. A placa de aquisição de dados permite compartilhar sinais de resposta de sensores com computador via USB. O modelo utilizado possui 16 canais de entradas analógicas diferenciais (ou 32 entradas *single-end*) com conversor A/D com 16 bits de resolução e taxa de amostragem de 250 kS/s (apenas um canal ou múltiplos canais). Estes canais de entradas apresentam acoplamento DC e faixas de tensão configuráveis de ± 10 V, ± 5 V, ± 1 V, ± 0.2 V. Possui 4 canais de saídas analógicas com conversor D/A com 16 bits de resolução e taxa de amostragem de 833 kS/s (apenas um canal), 740 kS/s (dois canais), 666 kS/s (três canais) e 625 kS/s (quatro canais). Estes canais de saída apresentam acoplamento DC, impedância de 0.2Ω e faixa de tensão configurável de ± 10 V (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

3.5 MÉTODOS.

Utilizando o circuito piezoelétrico, hardware e software de aquisição de dados, gerou-se um sistema de medição de densidade capaz de medir a densidade de líquidos e gerar informações para análise de resultados experimentais para validação de sua aplicação.

Para a utilização do sistema de medição de densidade, foram estudados três métodos de análise de informação. Estes métodos são descritos abaixo e servem para validar qual é a melhor forma de medição de densidade, ou seja, qual sinal deverá ser inserido no circuito piezoelétrico e qual método apresentará a melhor resposta de medição.

3.5.1 Primeiro Método

No primeiro método, aplica-se um sinal de onda quadrada de 150 Hz no primeiro transdutor piezoelétrico, que gera em si uma vibração mecânica. Considerando que o segundo transdutor está em contato com o primeiro, este receberá por contato a vibração mecânica do primeiro transdutor piezoelétrico, e consequentemente, através de suas propriedades piezoelétricas, converte a vibração mecânica em sinal elétrico (análise em frequência). Com a utilização do software *LABVIEW® 2011*, o sinal de resposta (elétrica) do segundo transdutor é analisado e consequentemente obtém-se a frequência natural do sistema.

Através da análise das respostas do segundo transdutor, foram coletados os dados de frequência. O *hardware* utilizado para enviar a informação ao transdutor foi um gerador de funções (EDUTEC EEL-8003) e para obter a resposta da vibração gerada no segundo transdutor, foi utilizada uma placa USB-6229 da *National Instrument*, juntamente com o software *LABVIEW® 2011* (ANEXO 1). Foram coletados dados de frequência de excitação do primeiro transdutor e a resposta em frequência do segundo transdutor

Foi inserido na entrada do primeiro transdutor piezoelétrico, um sinal de onda quadrada contínuo com frequências na faixa de 150 Hz e amplitude de $5V_{pp}$ de tensão. Através do *software* e com a ferramenta *DAQ Assistant (DAQmx)* do *LABVIEW®*, obteve-se a informação de entrada e saída do sensor. A ferramenta *DAQ Assistant*, foi configurada para a leitura de um número finito de amostras, tanto para leitura quanto para escrita, o número de amostras é de 2000 com uma taxa de amostragem de 20 kHz, ou seja, a cada 50 micros segundos (μs). A placa de aquisição através da ferramenta *DAQ Assistant* captura amostras até completar um total de 2000 amostras.

O sinal recebido passa por um filtro passa banda com topologia elíptica, frequência baixa de 50 Hz e frequência alta de 4000 Hz. Dois métodos foram usados para determinar a frequência natural do sistema: *Buneman Frequency Estimator* e o *Extract Single Tone Information*.

A FIGURA 14 mostra o fluxograma do sistema desenvolvido para análise da frequência natural do sistema. (ANEXO 1)

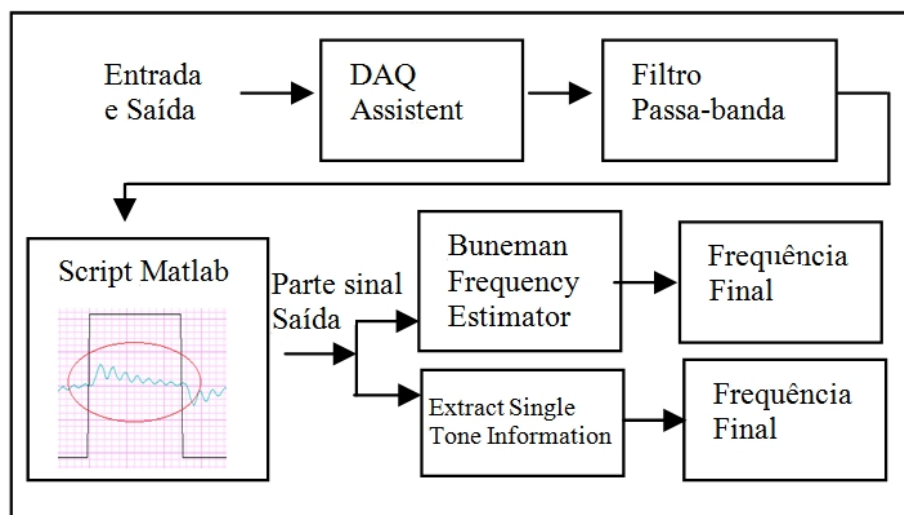


FIGURA 14: FLUXOGRAMA DO PROGRAMA PARA O PRIMEIRO MÉTODO.

Os sinais de entrada e saída consistem em sinais que se repetem no tempo, então para obter parte do sinal de saída e analisá-lo, foi desenvolvido um *script* no *software* Matlab integrado ao LABVIEW®, que consiste em armazenar uma parte do sinal de resposta. O *script* do Matlab (ANEXO 2) funciona da seguinte forma: como o sinal da entrada corresponde a um sinal de onda quadrada, onde uma parte do tempo estava em nível alto +5V e outra parte do tempo estava em nível baixo -5V, o *software* analisa o sinal de entrada e quando o sinal chega a nível alto, o código armazena o sinal de saída até que o sinal de entrada vá para nível baixo. Com o sinal armazenado apenas em um período do ciclo da entrada em nível alto, a resposta do sinal é analisada pelo *software* que calcula o tempo que leva para o sinal atingir um pico a outro, e calcula a frequência via *software*. O *software* realiza o cálculo da frequência, no número de vezes que o usuário desejar, no caso foi feito para 10 vezes e após isso calcula a média e o seu desvio padrão.

O experimento foi realizado com o sensor livre no ar, e o mesmo também imerso em cinco soluções com densidades diferentes.

3.5.2 Segundo Método

No segundo método utilizou-se um gerador de funções para energizar o primeiro transdutor, mas ao invés de utilizar uma onda quadrada com frequência

fixa, conforme o primeiro método, foi inserida uma onda senoidal com a faixa de frequência de 500 Hz a 4000 Hz variando de 1 em 1 Hz com tensão de 5V pico a pico. O objetivo é analisar a amplitude de resposta em cada frequência. A amplitude máxima corresponde à frequência natural do sensor. O *hardware* utilizado corresponde ao mesmo do primeiro método como mostra a FIGURA 11.

Inicialmente é inserida uma frequência senoidal de 500 Hz no primeiro transdutor. Através do *software* LABVIEW® e pela ferramenta *DAQmx* o sinal recebido passa pela *Extract Single Tone Information*, e salva em um vetor o valor da amplitude do sinal. A posição do sinal salvo corresponde à faixa de frequência lida. Os valores são salvos em um vetor, enquanto o gerador de frequência é variado de forma manual até 4000 Hz, esse sinal salvo é analisado. O limite da frequência de 4000 Hz deve ao tipo de transdutor utilizado, pois o seu funcionamento é na faixa de 2000Hz a 4000 Hz, após está faixa o transdutor não responde de forma adequada. Através de um script desenvolvido no Matlab (ANEXO 5), foi possível obter a amplitude máxima do sinal e a frequência relacionada a essa amplitude. Com isso obtém-se a frequência natural do sinal. A FIGURA 15 representa um fluxograma do *software* LABVIEW®.(ANEXO 4)

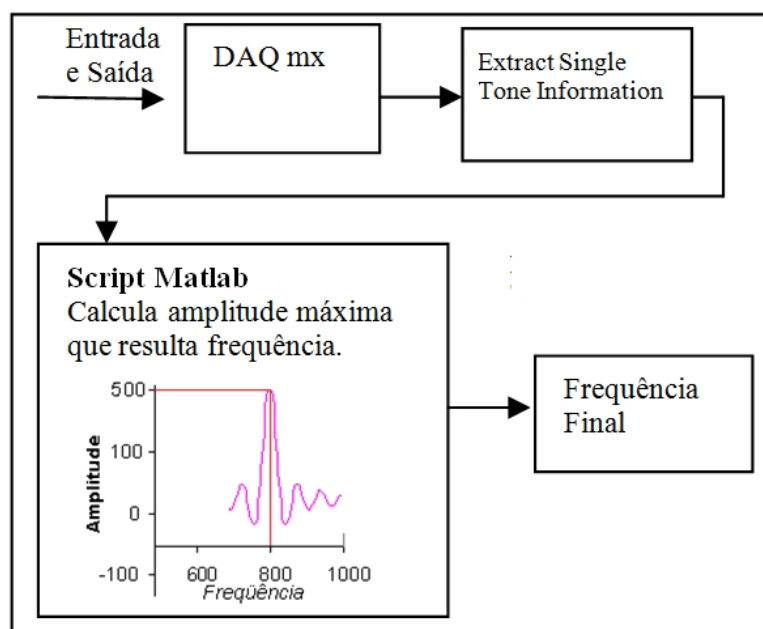


FIGURA 15: FLUXOGRAMA DO PROGRAMA SEGUNDO MÉTODO.

A experiência foi realizada várias vezes, mas na primeira análise procurou-se obter o maior número de valores possíveis para saber ao certo a frequência de

atuação. Ao repetir a experiência, a faixa de análise foi alterada em 100Hz para baixo e para cima do valor encontrado na frequência anterior.

Após realizar o experimento 10 vezes, foi calculada a média e o desvio padrão das frequências.

3.5.3 Terceiro Método

Com a incerteza da precisão da frequência que estava sendo aplicada no primeiro sensor e a faixa de frequência lida pelo método anterior, foi estudado um terceiro método para leitura de densidade.

O terceiro método trabalha com a inserção da onda senoidal através do software *LABVIEW®*, que ao ler a informação no segundo sensor e confirmar que a frequência é a mesma aplicada no primeiro sensor, o valor da amplitude é salvo e depois é alterado a frequência em um hertz.

Esse novo método é um processo demorado para realizar a leitura e escrita via *software* em uma faixa de frequência de 500 Hz a 4000 Hz variando de um em um Hertz com tensão de $5V_{pp}$. Então foi realizada apenas uma vez a leitura completa em cada amostra e após isso a faixa de frequência foi reduzida para 100 Hz para cima e para baixo da frequência de reposta encontrada. A FIGURA 16 mostra o fluxograma do *software* desenvolvido para obter a frequência natural do sistema. (ANEXO 7)

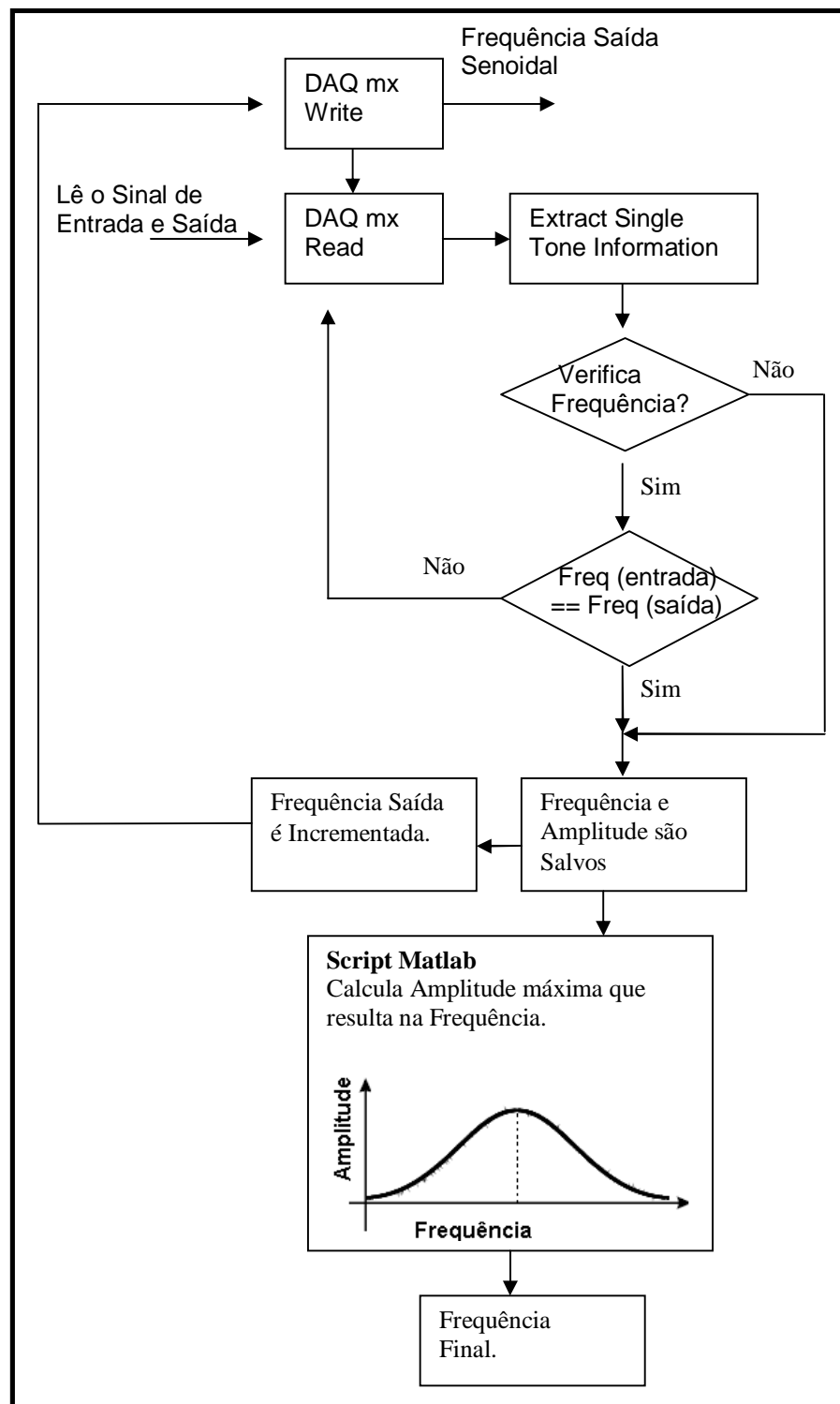


FIGURA 16: FLUXOGRAMA DO SOFTWARE NO TERCEIRO MÉTODO.

O LABVIEW® inicializa inserindo uma frequência de 500 Hz e faz a leitura através da ferramenta DAQmx. O sinal lido passa pela *Extract Single Tone Information (ESTI)*, onde apresenta a frequência e a amplitude do sinal. Esta frequência é comparada com a frequência inserida no primeiro transdutor e se for

igual, a amplitude do sinal é armazenada no vetor na posição correspondente ao valor da frequência e a saída é incrementada em um Hertz. Após analisar todas as faixas de frequência, o vetor salvo passa pelo *script* (ANEXO 8) onde é calculada a amplitude máxima que corresponde à frequência natural do sistema.

3.6 TEMPERATURA X DENSIDADE

Quando um líquido é aquecido, há variação do seu volume e, conseqüentemente, de sua densidade. Para verificar a atuação do sensor com relação à temperatura, foram realizados alguns experimentos, variando-se a temperatura do líquido.

O experimento consiste em variar a temperatura da água pura (destilada e deionizada) e verificar a variação da frequência.

Para o experimento foi utilizado somente o método 3, apresentado anteriormente, para obter a frequência natural do sistema.

3.7 VISCOSIDADE – MÉTODO VISCOSÍMETRO ROTATIVO ANALÓGICO

Para aferir os valores da viscosidade absoluta de algumas soluções, foi utilizado um viscosímetro rotativo analógico da marca QUIMIS modelo Q860A21 (FIGURA 17), que é amplamente utilizado para medir viscosidades de óleos, tintas, medicamentos, cosméticos, etc.



FIGURA 17: VISCOSÍMETRO ROTATIVO ANALÓGICO Q860A24.
FONTE: Adaptada de QUIMIS (2012)

O princípio deste instrumento corresponde a um motor síncrono que está conectado ao disco graduado, gira em velocidade estável e gira o spindle (rotores de aço inox) que está ligado a uma haste através de uma mola tipo “cabelo”. Se não houver resistência do fluido o *spindle* girará sincronizado com a mola, o indicador que corresponde ao disco graduado neste caso deverá mostrar a leitura zero. Caso o *spindle* seja submetido a certa resistência pela viscosidade da substância de teste, então haverá um torque na mola e o indicador conectado à mola deverá indicar uma leitura particular (o momento de torção da mola) no disco graduado do instrumento. Multiplicando essa leitura pelo coeficiente específico, será obtida a viscosidade do fluido (mPa.s - milí Pascal. Segundo). Então, para obter-se a viscosidade absoluta (η) pelo instrumento, basta multiplicar pelo fator encontrado na tabela de coeficiente (TABELA 3) com o valor indicado no disco graduado, isto é (QUIMIS, 2012):

$$\eta = K.\alpha \quad (14)$$

Onde:

η é a viscosidade absoluta

K é o coeficiente (este valor é encontrado na tabela de coeficiente dependendo do spindle)

α é a leitura indicada pelo ponteiro (ângulo de deflexão).

TABELA 3: VISCOSÍMETRO ROTATIVO ANALÓGICO Q860A24.

	RPM	SPINDLE 1	SPINDLE 2	SPINDLE 3	SPINDLE 4
L RPM	0.3	200	1000	4000	20000
	0.6	100	500	2000	10000
	1.5	40	200	800	4000
	3.0	20	100	400	2000
H RPM	6	10	50	200	1000
	12	5	25	100	500
	30	2	10	40	200
	60	1	5	20	100
COEFICIENTES					

FONTE: QUIMIS (2012)

A viscosidade é uma propriedade que influencia no sistema de medição, pois ocorre um atrito entre o fluido e a área de contato do sensor piezoelétrico, ou seja, pelo cisalhamento no mesmo. Por isso foram realizados alguns experimentos utilizando soluções com viscosidades variadas como óleo de soja, glicerol e trietanolamina para analisar o seu comportamento.

Como foi apresentado anteriormente utilizou-se um viscosímetro de laboratório rotativo analógico para aferir as viscosidades destes fluidos. Para isso considerou-se a temperatura ambiente, ou seja, 22°C.

O viscosímetro rotativo é um instrumento que necessita ser calibrado para que o resultado obtido esteja correto. Então antes de começar o experimento foi necessário calibrá-lo, através de um nível localizado na parte frontal do cabeçote.

Dependendo do valor da viscosidade, deve-se escolher o número do *spindle*. Para os experimentos foi escolhido o *spindle 2* devido à sua baixa viscosidade e à quantidade de líquido disponível. Como a solução do trietanolamina apresentava uma quantidade muito pequena de solução, não era possível ser utilizado o *spindle 1*, pois não atingia o seu nível necessário para a leitura correta. O *spindle* deve ser acomodado de modo que não tenha contato com as paredes e o fundo do recipiente. O mais indicado é mantê-lo centralizado com uma quantidade de amostra que seja suficiente para haver um espaçamento entre o fundo do recipiente e o *spindle*, de forma que o líquido cubra o mesmo e esteja no nível de leitura sem ultrapassá-lo.

Sempre que o *spindle* for imerso, deve-se verificar se este não formou bolha na amostra, ou seja, se o líquido está totalmente em contato com o mesmo.

3.8 APLICAÇÃO DE DENSIDADE – MEDIÇÃO DE GRAU BRIX

Muitas empresas utilizam sensores de densidade para obter o grau Brix. Então para analisar o funcionamento do sensor, foram realizados alguns experimentos com o objetivo de medir o grau Brix. Foram preparadas cinco soluções com diferentes concentrações de açúcar. O grau Brix corresponde à porcentagem de açúcar na solução.

Através de uma balança analítica de precisão 0,1g foram pesados 10 g, 20 g, 30 g, 40 g, 50 g e 60 g de açúcar separadamente. Para preparar cada solução utilizou-se uma proveta de 100 ml, que foi complementada com água pura até atingir 100 ml de solução. Este processo foi realizado para cada quantidade de açúcar, podendo assim obter solução de 10°BX, 20°BX, 30°BX, 40°BX, 50°BX e 60°BX.

Neste caso o experimento foi realizado com dois sensores, um com isolamento de verniz e outro sem isolamento, considerando que a solução não era solvente. O método utilizado para obter a frequência natural do sistema foi o método 3, e todos os líquidos estavam em temperatura ambiente, então foi desconsiderada a interferência da temperatura.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 RESULTADO OBTIDO DO PRIMEIRO MÉTODO

Abaixo é apresentado o resultado de medição de densidade utilizando o primeiro método.

No experimento para a simulação da entrada do primeiro transdutor com um sinal de onda quadrada com frequências na faixa de 150 Hz e amplitude de $5V_{pp}$ (tensão pico a pico), foi possível observar os resultados apresentados na TABELA 4. No ANEXO 3 é possível visualizar o painel frontal do LABVIEW como exemplo da simulação.

A mensuração da frequência pelo método de *Buneman* mostrou que o erro foi maior que o método do *Extract Single Tone Information*, ou seja, o resultado com relação à variação da frequência neste método apresenta um erro menor com relação ao outro método. Com este resultado, os próximos experimentos foram analisados apenas pelo método que utiliza a Transformada de Fourier através da ferramenta do LABVIEW® *Extract Single Tone Information*.

TABELA 4: RESULTADO DO PRIMEIRO EXPERIMENTO.

	Buneman	ESTI	Buneman	ESTI	Buneman	ESTI
Leitura	AR	AR	Etanol	Etanol	Óleo	Óleo
1	3858,01	3875,58	2527,11	2537,40	2404,29	2418,05
2	3851,58	3873,24	2527,27	2537,99	2410,22	2417,70
3	3184,80	3879,15	2526,04	2540,82	2418,55	2417,03
4	3850,09	3874,34	2528,03	2531,38	2408,25	2418,25
5	3856,22	3876,67	2526,63	2540,37	2406,66	2418,01
6	3861,49	3875,03	2526,65	2540,52	2408,48	2418,18
7	3860,34	3875,84	2523,51	2533,33	2405,97	2418,08
8	3184,30	3877,34	2523,98	2539,12	2409,25	2417,46
9	3850,75	3875,09	2523,53	2533,81	2406,48	2418,04
10	3869,94	3879,88	2525,35	2532,18	2406,82	2418,05
Média*	3853,90	3875,71	2526,33	2537,70	2407,54	2418,04
Desvio**	283,72	2,08	1,64	3,67	3,93	0,38
Dens***	0,001		0,850		0,920	

	Buneman	ESTI	Buneman	ESTI	Buneman	ESTI
Leitura	Água	Água	TEA	TEA	Glicerol	Glicerol
1	2158,94	2406,04	2431,54	2275,36	2177,85	2203,81
2	2159,80	2404,65	2381,58	2283,02	2186,25	2198,19
3	2159,42	2406,69	2381,28	2282,52	2176,21	2204,53
4	2212,23	2385,16	2376,91	2284,00	2182,05	2203,67
5	2158,74	2405,29	2377,16	2284,30	2178,47	2202,98
6	2159,04	2404,28	2381,17	2282,90	2179,82	2202,61
7	2160,22	2407,22	2378,95	2283,35	2179,34	2203,08
8	2158,39	2406,11	2381,19	2282,74	2177,31	2203,12
9	2159,72	2406,18	2381,35	2282,74	2177,55	2203,76
10	2159,51	2406,07	2378,64	2283,86	2178,64	2203,58
Média*	2159,46	2406,06	2381,18	2282,96	2178,55	2203,35
Desvio**	16,74	6,60	16,46	2,57	2,90	1,75
Dens***	1,000		1,120		1,250	

* Médias da frequência em Hz

** Desvio padrão das medidas de Frequência

*** Densidade relativa dos líquidos (g/ml)

ESTI = *Extract Single Tone Information*

TEA = Trietanolamina

4.2 RESULTADO OBTIDO DO SEGUNDO MÉTODO

Abaixo é apresentado o resultado de medição de densidade utilizando o segundo método e no ANEXO 6 é possível visualizar o painel frontal do LABVIEW com resultado de uma simulação.

No segundo experimento para a simulação da entrada utilizado um gerador de função com sinal senoidal com uma faixa de varredura de 500Hz a 4000Hz e amplitude de $5V_{pp}$ (tensão pico a pico), foi possível obter os resultados apresentados na TABELA 5.

TABELA 5: RESULTADO DAS EXPERIÊNCIAS PELO SEGUNDO MÉTODO.

Leitura	Frequência AR	Frequência Etanol	Frequência Óleo	Frequência Água	Frequência TEA	Frequência Glicerol
1	3797	2471	2388	2318	2217	2144
2	3804	2478	2387	2329	2220	2150
3	3804	2476	2388	2319	2215	2142
4	3797	2478	2385	2329	2224	2160
5	3796	2469	2391	2313	2207	2155
6	3795	2479	2384	2326	2214	2155
7	3791	2476	2388	2319	2215	2148
8	3803	2478	2386	2324	2218	2157
9	3795	2488	2389	2323	2201	2144
10	3803	2484	2378	2324	2211	2158
Média*	3797	2478	2387,50	2323,50	2215	2152,50
Desvio**	4,62	5,52	3,57	5,13	6,58	6,55
Densidade***	0,001	0,850	0,920	1,000	1,120	1,250

* Médias da frequência em Hz

** Desvio padrão das medidas de Frequência

*** Densidade relativa dos líquidos (g/ml)

TEA = Trietanolamina

Os resultados obtidos no segundo método apresentaram uma variabilidade maior do que o primeiro método. Isto se deve ao fato de utilizar um gerador de funções e alterar o valor da frequência de forma manual, o que faz com o resultado nem sempre apresente o mesmo valor, pois não se pode afirmar que o gerador passou por todas as frequências com precisão e, que ao se analisar o valor do mesmo não é possível afirmar que exista apenas uma faixa de frequência no sinal lido. Considerando que a aquisição de dados é realizada em uma determinada faixa de 2000 amostras. Esta faixa de tempo pode ter duas frequências diferentes para serem analisadas, o que extrai uma frequência e amplitude errada do sistema.

4.3 RESULTADO OBTIDO DO TERCEIRO MÉTODO

A diferença do terceiro método para o segundo está no fato de que o sinal será gerado via *software*, utilizando a placa USB-6229, e existe um controle de frequência para saber ao certo se o valor do segundo sensor corresponde exatamente ao valor inserido. O ANEXO 9 apresenta um resultado de simulação no painel frontal do LABVIEW.

Após realizar o experimento 10 vezes, foi calculada a média e o desvio padrão da frequência, como mostra a TABELA 6.

TABELA 6: RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS PELO TERCEIRO MÉTODO.

	Frequência	Frequência	Frequência	Frequência	Frequência	Frequência
Leitura	AR	Etanol	Óleo	Água	TEA	Glicerol
1	3823	2497	2389	2339	2221	2159
2	3833	2497	2383	2333	2221	2157
3	3821	2493	2385	2339	2221	2157
4	3823	2493	2385	2337	2221	2159
5	3821	2491	2383	2339	2221	2159
6	3821	2491	2383	2337	2221	2159
7	3821	2491	2381	2337	2221	2159
8	3823	2491	2383	2337	2221	2157
9	3823	2491	2383	2337	2221	2161
10	3821	2491	2383	2337	2221	2157
Média*	3822	2491	2383	2339	2221	2159
Desvio**	3,65	2,46	2,15	1,75	0,00	1,35
Densidade***	0,0010	0,8500	0,92	1,00	1,12	1,25

* Médias da frequência em Hz

** Desvio padrão das medidas de Frequência

*** Densidade relativa dos líquidos (g/ml)

TEA = Trietanolamina

Com esse método foi possível observar um desvio padrão menor, em relação aos outros métodos.

4.4 RESULTADO FINAL PARA OS TRÊS MÉTODOS

A FIGURA 18 apresenta os resultados obtidos pelos três métodos, onde é relacionada a densidade de cada líquido com a frequência obtida pelo sistema de medição de densidade. Pode-se verificar que quanto maior a densidade do líquido, menor é a frequência, ou seja, o sensor de baixo custo funciona conforme o conceito de amortecimento mecânico, onde a frequência de vibração é diferente devido à absorção de energia em contato com o líquido. A inércia, devido à carga de massa do líquido sobre o sensor, foi responsável pela mudança da frequência natural do sistema.

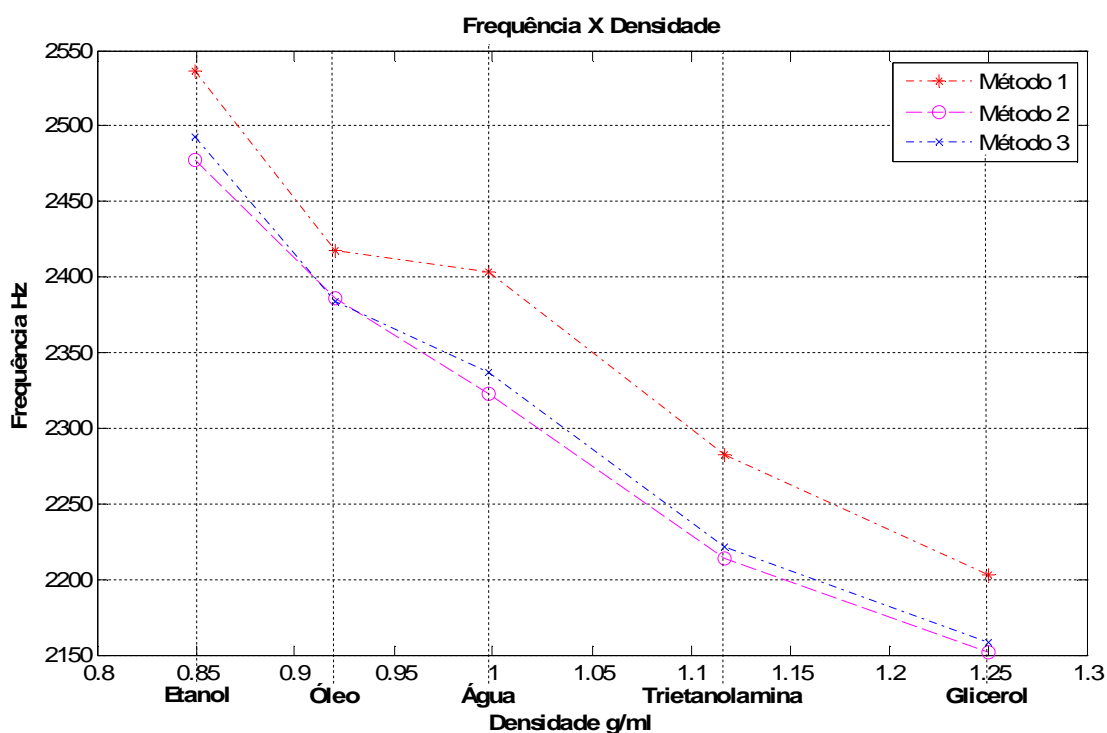


FIGURA 18: RESULTADOS DOS TRÊS MÉTODOS.

Ainda na FIGURA 18, pode-se visualizar que a faixa de frequência entre método 1 e os outros dois métodos são diferentes. Isso deve-se ao método de energização do sensor. Como foi apresentado anteriormente, quando energiza-se um sensor com ondas quadradas, que é o caso do método 1, a resposta de

frequência é maior do que quando energiza-se um sensor com onda senoidal que é o caso dos outros dois métodos.

Para analisar os três métodos, foi utilizada a ferramenta do *Matlab boxplot* que é conveniente para representar graficamente os grupos de dados para cada metodologia utilizada.

O *Boxplot* foi introduzido pelo estatístico americano John Turkey em 1977 e é uma forma de representar graficamente os dados de uma variável quantitativa em função de seus parâmetros. Representado por uma caixa (Box), que é delimitada pelos valores correspondentes ao primeiro quartil, mediana e terceiro quartil. A linha central que corresponde à mediana do conjunto de dados. O primeiro quartil (Q1) corresponde à parte inferior da caixa delimitada pelos 25% dos dados, o terceiro quartil (Q3) é a parte superior delimitada pelos 75% dos dados. A distância entre eles representa a distância interquartilica (Q3-Q1). Os chanfros são delimitados pelo maior e menor valor do conjunto de dados. Estes valores não podem ultrapassar os limitadores, ou seja, o menor valor não pode ser inferior a $Q1 - 1,5(Q3-Q1)$ e o maior valor não deve ultrapassar $Q3 + 1,5(Q3-Q1)$. Os valores fora desses limitadores, que destoam muito do restante, são considerados *outliers* plotados por '+'. Os *outliers* demonstraram os valores maiores que 1,5 vezes a distância interquartilica (AHMED et al., 2001) .

Com esta ferramenta é possível avaliar as simetrias dos dados, a dispersão dos três conjuntos e a existência ou não de *outliers* do mesmo sendo de muita ajuda na comparação dos três conjuntos de dados dos experimentos realizados.

O *boxplot* que apresenta a menor caixa corresponde a uma frequência mais estável, enquanto que o inverso corresponde a uma variação da frequência e uma instabilidade nas medidas. Os *outliers* podem acontecer como um erro de leitura, mas isto afeta a média das frequências.

A FIGURA 19 apresenta os resultados obtidos nos três métodos com o sensor livre no ar e em cinco soluções com densidades diferentes.

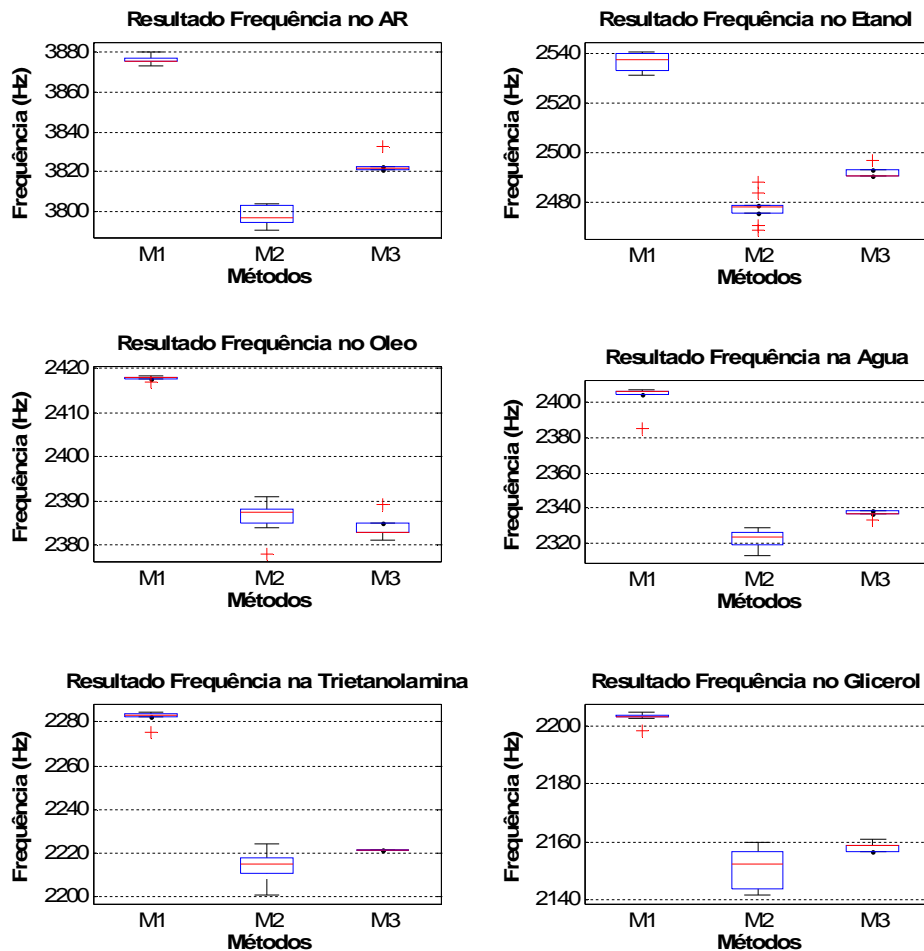


FIGURA 19: RESULTADOS DAS FREQUÊNCIAS PARA CINCO LÍQUIDOS.

Pode-se observar que o método 1 e 3 apresentam menor dispersão que o método 2. A instabilidade está relacionada a uma experiência realizada manualmente, pois foi utilizado um gerador de funções para energizar o circuito com uma onda senoidal e este sinal deve ser variado de forma manual, ou seja, em um Hz, o que pode gerar um erro.

No primeiro método foi possível observar uma faixa de frequência diferente dos outros dois métodos. Isso se deve ao fato da técnica ser um pouco diferente dos outros métodos. No método 1, o sinal do sensor é alimentado com um sinal fixo que gera um pulso na entrada do sensor e analisa o sinal de ressonância. Dependendo do tipo de líquido este sinal de ressonância é fraco e com poucas informações que podem gerar um erro numérico que consiste na diferença da faixa de frequência. Esta diferença de faixa de frequência entre os métodos pode ser resolvida com a

calibração do sistema. Ou seja, este método não deve ser desprezado, pois a informação da frequência para ele é estável assim como no método 3.

O modelo mais simples de relacionar duas variáveis é através de uma equação da reta, que caracteriza um comportamento linear do sistema. Como os valores obtidos das médias das frequências dos experimentos apresentam uma distribuição dos pontos com uma aparência de uma reta, então obteve-se a equação da reta para método 1 e 3 como mostra a FIGURA 20.

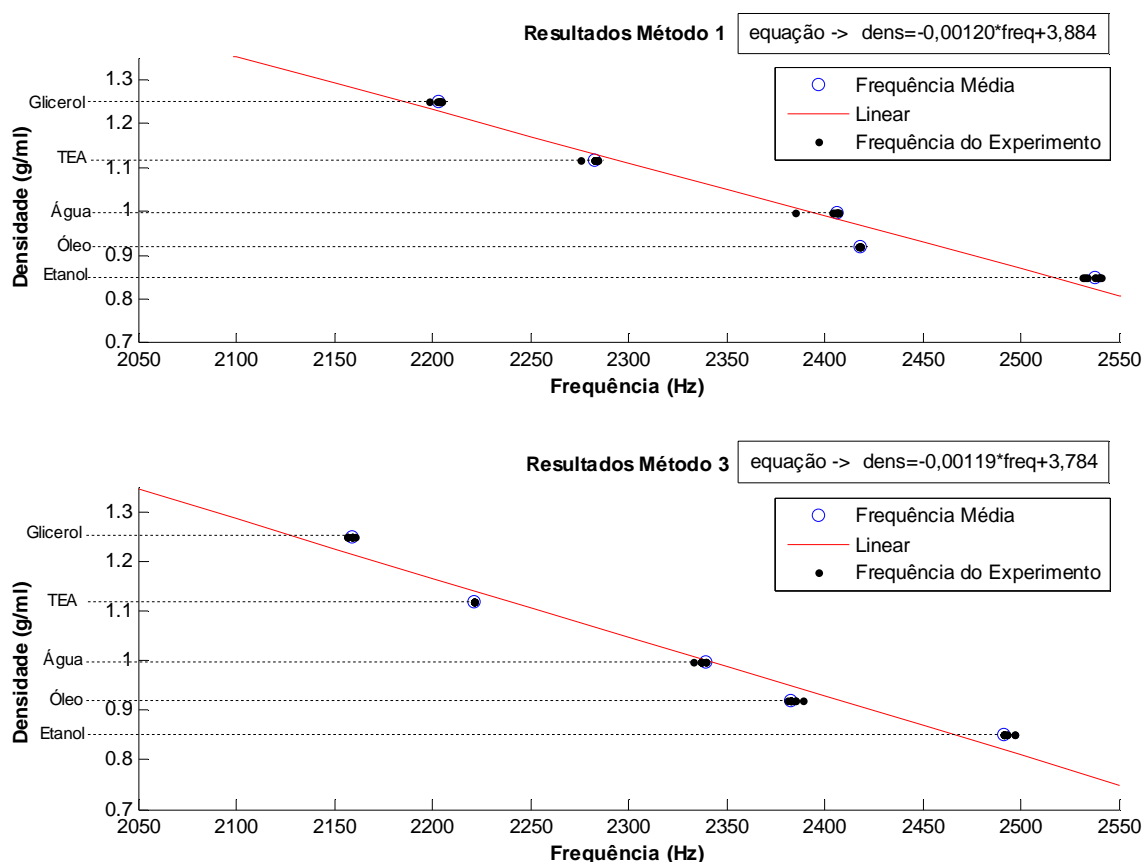


FIGURA 20: EQUAÇÃO DA RETA PARA O MÉTODO 1 E 3.

Através da equação da reta é possível obter a densidade de um líquido com a frequência obtida do sensor. A FIGURA 20 representa a linearização dos experimentos é possível observar que os pontos médios da frequência estão bem próximos da reta, ou seja, com o sistema projetado, foi possível determinar a densidade dos líquidos, e observar que, quanto maior a frequência, menor é a densidade do líquido.

Como o método 1 e 3 apresentam resultados satisfatórios, então para quantificar os resultados obtidos, foi utilizado o indicador estatístico, a raiz dos erros

quadráticos médios (RMSE, do inglês *root-mean-square error*), onde é possível obter o valor real do erro através da equação 15.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d(i) - \hat{d}(i))^2} \quad (15)$$

Onde, N é o número de amostras, d(i) é o valor da densidade relacionado a uma frequência obtida, através da equação da reta obtida pela média das frequências e a densidade dos líquidos e $\hat{d}(i)$ corresponde ao valor previsto da densidade.

A TABELA 7 apresenta o erro RMSE para os dois métodos nas cinco densidades dos líquidos.

TABELA 7: RESULTADO DO ERRO RMSE.

	Método 1	Método 3
Etanol	0,0256	0,0313
Óleo de Soja	0,048	0,0284
Água	0,0150	0,006
Trietanolamina	0,0146	0,025
Glicerol	0,0228	0,0335
Total Erro para Soluções Analisada (g/ml)	0,028	0,0267

A TABELA 7 apresenta o erro RMSE total onde o método 3 apresenta um erro ligeiramente menor que o método 1. O método 3 apresentou o melhor resultado, porém é mais lento que o método 1, pois é necessário realizar uma varredura em uma faixa de frequência para obter a frequência natural do sistema. Já o primeiro método é mais rápido e pode-se obter a média de uma grande quantidade de amostras em um curto intervalo de tempo.

Comparando o resultado obtido com o sistema de medição de densidade projetado com os instrumentos existentes no mercado, como mostra a TABELA 8 pode-se concluir que o erro de medição de densidade para o sistema proposto é viável e apresenta um baixo custo.

TABELA 8: COMPARANDO RESULTADO COM INSTRUMENTO EXISTENTE NO MERCADO

	Resolução Densidade
Medidor por Efeito Coriolis	0,0005 g/cm ³
Medidor por Pressão Diferencial Hidrostática	0,01 g/cm ³
Medidor Raios Gama	0,5% valor medido
Sensor Projeto	0,0267 g/cm ³

4.5 RESULTADOS DA ANÁLISE DA TEMPERATURA VERSUS DENSIDADE

Foi analisada a interferência da temperatura com relação à frequência do piezoelétrico. Sabe-se que quando maior a temperatura, menor a densidade de um líquido. Considerando os experimentos realizados, se a densidade diminui deve-se aumentar a frequência.

Porém, se observar o resultado obtido na FIGURA 21, pode-se verificar que o resultado foi oposto do que se esperava. Isso se deve ao fato da dilatação do metal que interfere na vibração do sensor, quanto maior a área do sensor maior é a resistência mecânica, ou seja, o PZT que recebe a mesma alimentação se tiver uma estrutura maior irá vibrar menos que o PZT de estrutura menor. Pode-se concluir que, com o aumento da área, a frequência deve diminuir, o que interfere diretamente no resultado final. O piezoelétrico não sofre influência com a temperatura, porém, se compararmos o coeficiente de dilatação do metal do *buzzer* piezoelétrico com o coeficiente de dilatação da água, conclui-se que a liga de níquel sofre uma influência maior no resultado final. Outra influência no resultado errôneo do experimento está ligado ao fato de utilizar um transdutor piezoelétrico de cerâmica que, ao ser aquecido, abrem-se os poros dos cristais piezoelétricos. Quando imerso em líquido, faz com que o sensor fique mais pesado interferindo na vibração do mesmo. Os dados da FIGURA 21 são importantes apenas para calibrar o sistema com relação à faixa de atuação do sensor.

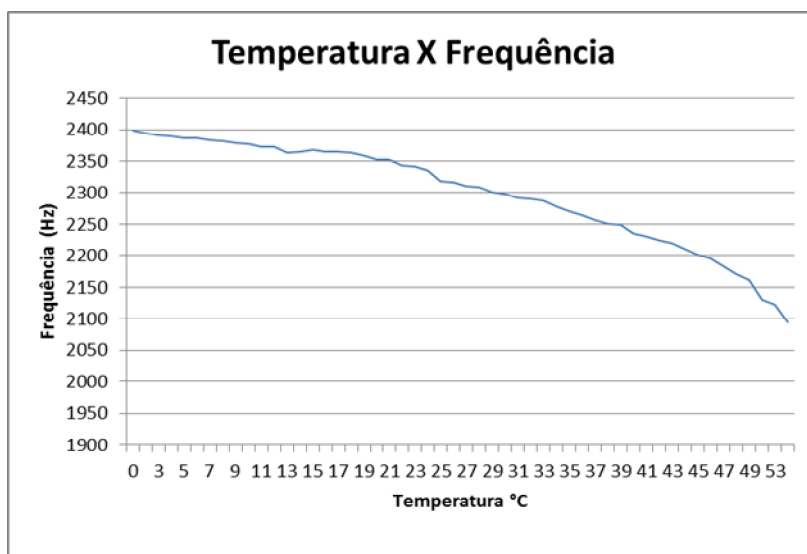


FIGURA 21: RESULTADO DA RELAÇÃO TEMPERATURA X FREQUÊNCIA

A FIGURA 22 apresenta a relação densidade *versus* temperatura, nela pode-se observar o resultado da densidade da água pura (destilada e deionizada) com base no QUADRO 1 e a densidade da água baseando na equação linear do sistema para o método 3, seguindo os resultados obtidos e apresentado FIGURA 20.

Há uma diferença entre os resultados, mas isso não interfere na utilização do sensor, pois com a faixa de temperatura determinada, basta calibrar o sistema para cada faixa de frequência necessária.

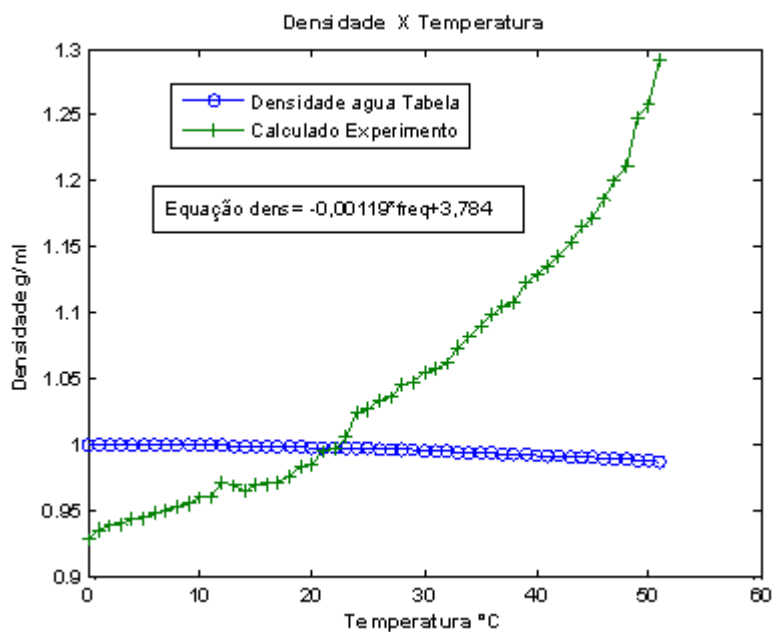


FIGURA 22: DENSIDADE VERSUS TEMPERATURA DA ÁGUA.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE

4.6.1 Resultado da Viscosidade Utilizando Instrumento Comercial Manual

Através do viscosímetro rotativo analógico e, considerando a temperatura ambiente, foi realizado o experimento para obter a viscosidade do óleo de soja, glicerol e trietanolamina.

A primeira leitura foi realizada com o óleo de soja e o *spindle* utilizado foi o número 2. Foram realizadas seis leituras em duas velocidades diferentes. A TABELA 9 representa a leitura da viscosidade do mesmo.

TABELA 9: VISCOSIDADE DO ÓLEO DE SOJA.

Velocidade	K Tabela 3 Coeficiente	α Ângulo de deflexão	Viscosidade Absoluta
H – 60 rpm	5	11	55 mPa.s
H – 60 rpm	5	11	55 mPa.s
H – 60 rpm	5	11	55 mPa.s
H – 30 rpm	10	5,5	55,5 mPa.s
H – 30 rpm	10	5,5	55,5 mPa.s
H – 30 rpm	10	5,5	55,5 mPa.s
Média Viscosidade			55,25 mPa.s

A segunda leitura foi realizada com o glicerol, o *spindle* utilizado foi o número 2. Foram realizadas seis leituras em duas diferentes velocidades. A TABELA 10 representa a leitura da viscosidade do mesmo.

TABELA 10: VISCOSIDADE DO GLICEROL.

Velocidade	K Tabela 3 Coeficiente	α Ângulo de deflexão	Viscosidade Absoluta
H – 60 rpm	5	38,5	192,5 mPa.s
H – 60 rpm	5	38,6	193 mPa.s
H – 60 rpm	5	38,8	194 mPa.s
H – 30 rpm	10	19,4	194 mPa.s
H – 30 rpm	10	19,4	194 mPa.s
H – 30 rpm	10	19,4	192 mPa.s
Média Viscosidade			193,25 mPa.s

A terceira leitura foi realizada com a trietanolamina, o *spindle* utilizado foi o número 2. Foram realizadas seis leituras em duas velocidades diferentes. A TABELA 11 representa a leitura da viscosidade do mesmo.

TABELA 11: VISCOSIDADE DO TRIETANOLAMINA.

Velocidade	K Tabela 3 Coeficiente	α Ângulo de deflexão	Viscosidade Absoluta
H – 60 rpm	5	55,1	275,5 mPa.s
H – 60 rpm	5	54,8	274 mPa.s
H – 60 rpm	5	55	275 mPa.s
H – 30 rpm	10	28	280 mPa.s
H – 30 rpm	10	27,9	279 mPa.s
H – 30 rpm	10	28	280 mPa.s
Média Viscosidade			277,25 mPa.s

4.6.2 Análise da Viscosidade dos Líquidos Utilizando o Sistema de Medição Projetado.

Utilizando o mesmo sistema de medição de densidade, porém, agora para uma atual análise da viscosidade dos fluidos, foram realizados alguns experimentos com a finalidade de observar se é possível verificar uma resposta que possa apresentar uma possível medição de viscosidade. Para tal, foi utilizado o método 3 de medição de densidade, porém agora, para observar a viscosidade dos fluidos.

O resultado obtido no experimento, utilizando o método 3, com o óleo de soja, trietanolamina e glicerol, considerando a temperatura ambiente pode ser observado na FIGURA 23.

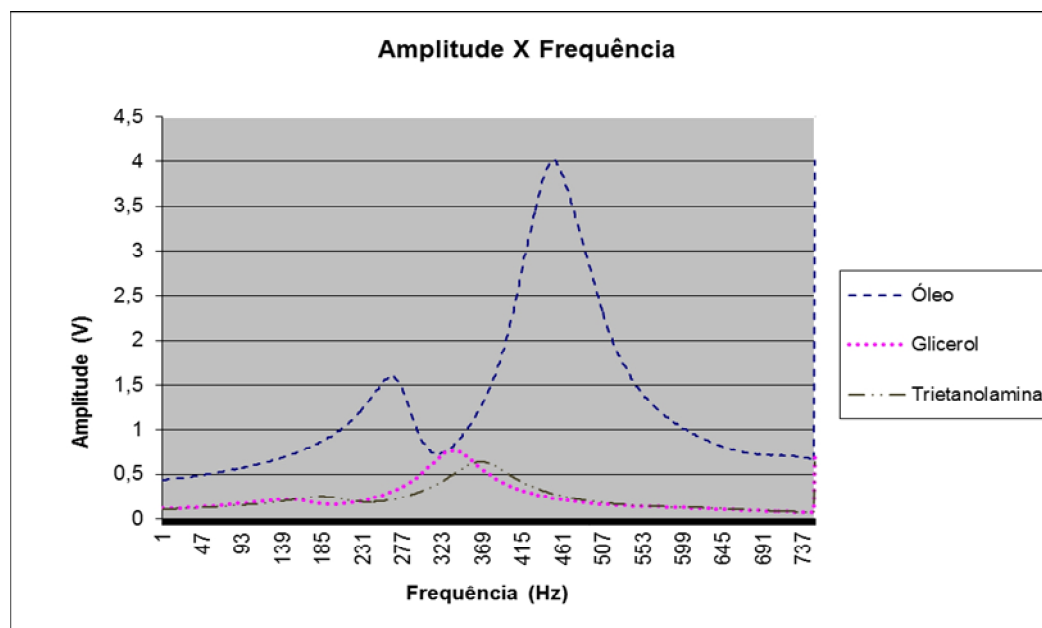


FIGURA 23: VISCOSIDADE - RELAÇÃO AMPLITUDE X FREQUÊNCIA

Analisando o resultado pode-se observar que o óleo é menos viscoso que o glicerol e a trietanolamina conforme foi medido pelo o instrumento de laboratório e pelo sistema de medição de densidade, pois a amplitude do sinal de resposta do óleo é maior que nas duas outras soluções. Isto deve-se ao fato de que há um menor atrito de cisalhamento do líquido, o que faz com que haja uma perda menor de energia. Já o glicerol é menos viscoso que o trietanolamina. Este mesmo resultado pode ser observado com o viscosímetro rotativo analógico.

A FIGURA 24 mostra a relação entre a viscosidade e a amplitude do sinal, como foi visto na figura anterior, que, quanto maior a viscosidade menor é amplitude do sinal.

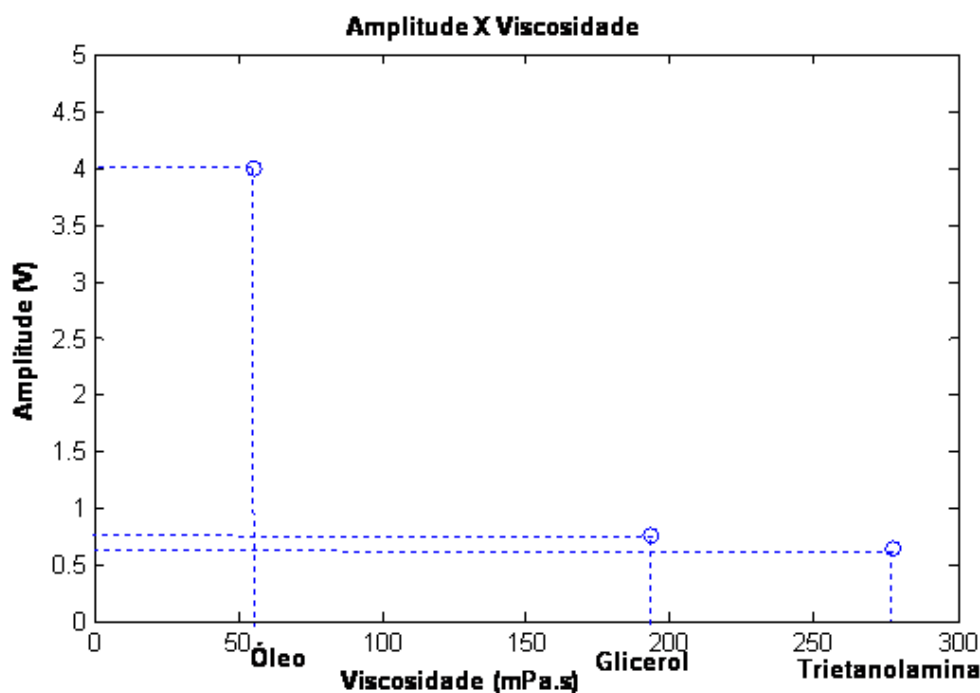


FIGURA 24: RELAÇÃO AMPLITUDE X VISCOSIDADE.

4.7 RESULTADOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU BRIX DE ALGUMAS SOLUÇÕES.

A TABELA 12 mostra a média das medidas das frequências de ressonância dos experimentos que foram obtidas através do sistema de medição de densidade. No ANEXO 10 e 11 é possível observar a medida de cada experimento. Foram analisados cinco soluções, com dois tipos de sensores: com verniz e sem verniz. Neste caso o verniz foi utilizado para isolar o meio do sensor, sendo uma proteção de integridade do sensor. Pode-se observar que, quanto maior a porcentagem de açúcar na solução, maior é a densidade e, conseqüentemente, menor é a frequência de ressonância. Em todos os experimentos realizados foi considerado que as soluções estavam à temperatura ambiente.

TABELA 12: RESULTADOS FREQUÊNCIAS EM DOIS SENSOES.

	10 °Brix Freq (Hz)	20°Brix Freq (Hz)	30°Brix Freq (Hz)	40 °Brix Freq (Hz)	50 °Brix Freq (Hz)	60 °Brix Freq (Hz)
Média Sem Verniz	2281	2255	2221	2191	2161	2131
Média Com Verniz	2353	2321	2301	2285	2251	2212
Densidade (g/ml)	1,0381	1,081	1,127	1,176	1,229	1,286

O resultado obtido pelo sensor sem verniz apresenta uma variação menor na frequência. Isso deve-se ao fato do transdutor piezoelétrico estar diretamente em contato com o líquido, já o sensor com o verniz tem um isolamento, o que resulta em uma sensibilidade menor à mudança da porcentagem de açúcar em um meio líquido. Com o resultado obtido, foram plotados os valores da frequência em função da densidade como mostra a FIGURA 25.

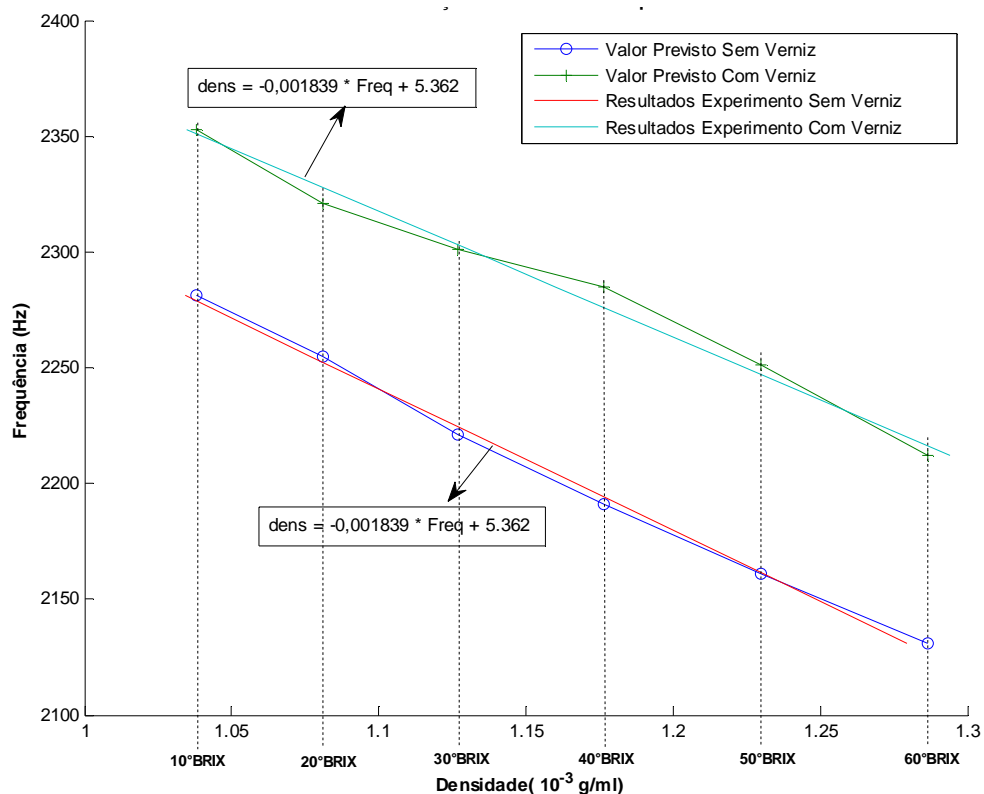


FIGURA 25: FREQUÊNCIA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE

A FIGURA 25 apresenta o que foi possível verificar em outros experimentos, com o aumento da densidade a frequência de ressonância diminui devido ao amortecimento provocado pelo líquido com relação ao sensor.

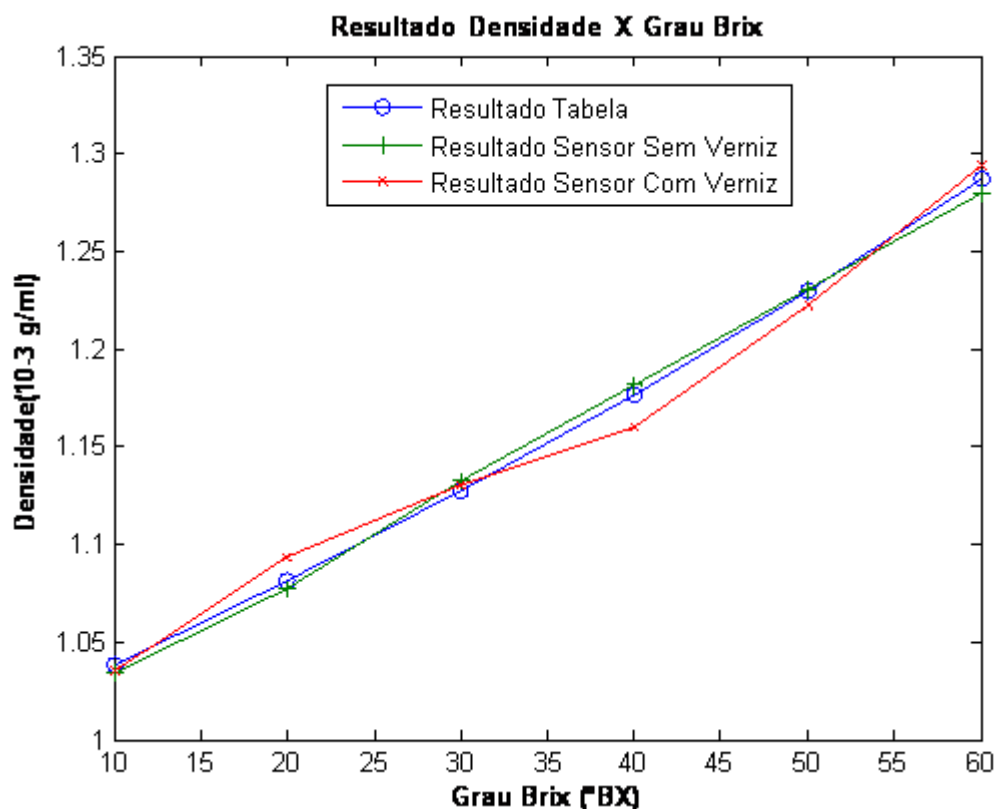


FIGURA 26: RESULTADO DENSIDADE X GRAU BRIX.

A FIGURA 26 apresenta o resultado relacionado com a TABELA 12 que foi apresentada na FIGURA 25 e o QUADRO 1 que relaciona temperatura versus grau Brix. Com o resultado obtido na FIGURA 26 foi possível constatar que o sensor apresentou um desvio de 0,006 (ANEXO 12) com relação à medição de grau Brix.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudado o funcionamento de instrumentos para medir densidade, existentes no mercado, e como construir um sensor de baixo custo utilizando um transdutor piezoelétrico. A escolha de um sensor piezoelétrico deu-se por existirem diversos sensores de densidade, utilizando estas características. Para a construção de um sensor de baixo custo, utilizando transdutor piezoelétrico, foi necessário estudar o comportamento deste quando imerso em líquidos e os conceitos de vibração.

Para a utilização do sensor piezoelétrico, foi projetado um sistema de medição de densidade composto de *hardware* de aquisição e *software* de tratamento e análise das informações.

Para a utilização do sistema de medição de densidade, foram elaborados três métodos de medir a densidade de líquidos, métodos estes que tornaram possíveis obter resultados satisfatórios para medição de densidade. Os protótipos de medição criados geraram resultados próximos entre si, porém, cada método utilizado apresentou suas vantagens e desvantagens de utilização.

Para o primeiro método utilizou-se um sinal estacionário, que apresenta uma frequência fixa na entrada do sensor, entrada esta que correspondia a um sinal de onda quadrada com uma frequência de aproximadamente 150 Hz. O resultado deste experimento apresentou um erro baixo de leitura, o *software* desenvolvido permite analisar a média da frequência do sinal e de quantas amostras forem necessárias em um tempo de resposta muito rápido, comparando com os outros dois métodos. A fonte de alimentação utilizada foi um gerador de função, mas que pode ser substituído por um *hardware* de fácil implementação prática.

O segundo e terceiro métodos utilizaram sinais de entrada senoidais cujas frequências variavam ao longo do tempo. São métodos mais demorados para obter a frequência de resposta, pela necessidade de varrer uma faixa de frequências de aproximadamente 3000 Hz.

O terceiro método foi uma automatização do segundo método, onde a fonte de entrada foi gerada por um *software* que controla tanto a entrada como a saída de informação, não sendo necessária a utilização de um gerador de função.

Pode-se concluir que, com a utilização de processamento de sinais neste sensor de baixo custo, foi possível obter desvio padrão relativo à densidade de 0,0267 g/ml.

Com os três métodos de medição de densidade, comprova-se que o sistema de medição de densidade projetado possui dados válidos comparados com outros sistemas de medição de densidade existentes. Para o presente estudo, validaram-se os resultados com as medições manuais realizadas e descritas.

Em um estudo complementar com o sistema de medição piezoelétrico, foi possível analisar ainda a influência da temperatura no mesmo. A resposta obtida é importante para a calibração do sistema. Observou-se o efeito do fenômeno físico que interferiu no resultado das medições, que foi a dilatação térmica dos materiais do sensor piezoelétrico.

Muitas indústrias alimentícias utilizam sensores de densidade para obter o grau Brix, que corresponde à concentração de açúcar em um meio líquido. O grau Brix é proporcional à densidade do produto, por isso, o trabalho mostra um estudo direcionado a essa unidade de medida de concentração e apresenta um resultado satisfatório, também validado com medições manuais que foram descritas no presente estudo.

Ao aplicar o sistema de medição de densidade, porém com o objetivo de observar a influência da viscosidade no sensor piezoelétrico, observou-se algumas respostas coerentes com as viscosidades de alguns líquidos selecionados para este experimento. Foi possível observar a perda gradativa da amplitude do sinal no sensor piezoelétrico, quando aplicado a líquidos com viscosidades maiores, o que mostra um consumo de energia elétrica maior em líquidos com maiores viscosidades, gerando uma relação de amplitude do sinal piezoelétrico com a viscosidade do líquido.

Para continuidade do presente trabalho, há vários campos de atuação para observação das respostas obtidas.

A primeira sugestão de estudo para trabalhos futuros pode concentrar-se na influência da temperatura do líquido medido e na análise da resposta da frequência do sensor piezoelétrico, como encontrar uma relação que faça uma compensação no sensor aplicado e gere o resultado esperado de acordo com o conceito de densidade, que, ao aumentar a temperatura de um líquido, sua densidade deverá

diminuir. E também para este caso, pode-se implementar um sensor de temperatura acoplado no sistema para que esta compensação torne-se dinâmica.

A medição de viscosidade feita pelo presente sistema de medição de densidade projetado pode ser explorada especificamente para este fim, pois aqui foi apenas apresentada a influência da viscosidade do líquido na amplitude de tensão de resposta do sensor piezoelétrico. Para tal, há a motivação de especificar um sistema semelhante, porém com as devidas características específicas para este objetivo.

O presente sensor piezoelétrico projetado, juntamente com o seu circuito eletrônico possui baixo custo, o que pode-se considerar como uma vantagem construtiva. Caso este mesmo circuito seja implementado para aplicações industriais, deve-se atentar para a robustez do mesmo, pois para todos os estudos foram consideradas condições de temperatura ambiente, líquidos não pressurizados e não corrosivos. Esta pode ser mais uma motivação para continuidade dos estudos da aplicação do presente sistema de medição, aplicações de tecnologias de materiais capazes de suportar situações de processos industriais.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 8304 : **Líquidos usados em fundição - Determinação da densidade relativa pelo método do picnômetro - Método de ensaio**, 1983.

ABNT NBR ISO 2909 : Petroleum products -- Calculation of viscosity index from kinematic viscosity, 2002.

AGOSTON A.,KEPLINGER F.& JAKOBY B.; **Evaluation of a vibrating micromachined cantilever sensor for measuring the viscosity of complex organic liquids**; Sensors and Actuators A: Physical, 2005 vol 123-124 , pp. 82–86.

AGOSTON A., ÖTSCH C.,JAKOBY B., **"Viscosity sensors for engine oil condition monitoring — Application and interpretation of results"**, Sensors and Actuators A: Physical, 2005, vol 121, pp. 327–332.

AHMED N., D.F. NINO, V.T. MOY, **Measurement of solution viscosity by atomic force microscopy**, Rev. Sci. Instrum. 72 (6) (2001) 2731–2734.

AKCELRUD, LENI. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. Barueri. Editora Manole, 2007. 176 p.

ALVES, EVARISTO O. **Medição de Densidade e Concentração em Processo Industriais**. Disponível em<
<http://www.smar.com/newsletter/marketing/index13.html>> Acesso em 10 junho 2011, 19:04.

BALL, D. W. **Concentration Scales for Sugar Solutions** *Journal of Chemical Education*, 2006, 83, 1489

BALLANTINE D.S., WHITE R.M., MARTIN S.J., RICCO A.J., ZELLERS E.T., FRYE G.C., WOHLTJEN H., **Acoustic Wave Sensors : Theory, Design, and Pysico-chemical Applications**, Academic Press, 1997.

BERGAUD C., NICU L., **Viscosity measurements based on experimental investigations of composite cantilever beam eigen frequencies in viscous media**, Rev. Sci. Instrum. 71 (6) (2000) 2487–2491.

CHANG, S.-M.; MURAMATSU, H.; NAKAMURA, C. & MIYAKE, J. **The principle and applications of piezoelectric crystal sensors** Materials Science and Engineering: C, 2000, 12, 111 - 123

EMMERICH, A. & L., Universidade Técnica de Brunswick; recomendada oficialmente pela **ICUMSA**, 20ª sessão 1990.

EMERSON PROCESS. **Apresenta documenta técnica do instrumento.** Disponível em < http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public_public_mmisami/documents/data_sheets/ps-00374.pdf > Acesso em 12/06/2011

ENDRESS+HAUSER. **Apresenta documentação técnica do instrumento.** Disponível em: < <http://www.shin-asystem.co.kr/product/pdf/FML621%20catalogue%20eng.pdf> > Acesso em 24/11/2012.

EYRING, H., (1941), “**Viscosity and diffusion**” in: Glasstone ,S., Laidler, K.J. e Eyring, H., The Theory of Rate Process, Capítulo 9, New York, McGrawHill.

GOUBAIDOUILLINE, I.; REUBER, J.; MERZ, F. & JOHANNSMANN, D., **Simultaneous determination of density and viscosity of liquids based on quartz-crystal resonators covered with nanoporous alumina**, Journal of Applied Physics, 2005, 98, 014305 -014305-4

HEMPE, J.K.; LAUXWN, R.C.; SAVAGE, J.E. **Rapid determination of egg weight and specific gravity using a computerized data collection system.** Poultry Science, v.67, p.902-907, 1988.

HIROSHI MURAMATSU, EIICHI TAMIYA, I. K. **Computation of Equivalent Circuit Parameters of Quartz Crystals in Contact with Liquids and Study of Liquid Properties** Analytical Chemistry, 1988, 60, 2142 - 2146

IKEDA T., **Fundamentals of piezoelectricity**, New York Oxford, 1990

JAFFE, B., COOK, W. R., JAFFE, H.; **Piezoelectric Ceramics**, 1a Ed, London & N.Y. Academic Press, 1971.

KIRITSIS N., HUANG Y, AYRAPETYAN D, A **Multi-Purpose Vibration Experiment Using Labview** *Proceedings of the 2003 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, 2003 pg. 5

LAKSHMANAN, R. S. & MUTHARASAN, R. **Nature of sensitive high-order resonant modes in piezoelectric excited millimeter sized cantilever (PEMC) sensors**, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 171, 79 - 86

LANGEVIN P., Patente francesa 505.703 (1920) e LANGEVIN P., Patente Britânica 145.691 (1921)

MARTIN, S.; FRYE, G. & WESSENDORF, K. **Sensing liquid properties with thickness-shear mode resonators**, *Sensors and Actuators A: Physical*, 1994, 44, 209 - 218

MCCLELLAND, B. D. & RORRER, R. A. L.; **Meso-Scale Oil Condition Sensor** *ASME Conference Proceedings*, ASME, 2011, 2011, 351-358

MCLOUGHLIN N., S.L. LEE, G. HAHNER, **Simultaneous determination of density and viscosity of liquids based on resonance curves of uncalibrated microcantilevers**, *Applied Physics Lett.* 89 (18) (2006).

MURATA. **Manual do componente Buzzer Piezoeletrico**. Disponível em : < www.murata.com/products/catalog/pdf/p15e.pdf > Acesso em 10 novembro 2012.

MURAMATSU H., TAMIYA E. , KARUBE I., **Anal. Chem.** 60, 2142 (1988).

NADAIS, ANDRE. **Evolução da medição de vazão por Corilois** .Disponível em < [http://www.br.endress.com/eh/sc/america/br/pt/resourceadditional.nsf/imgref/Download_ArtigoCoriolis.pdf/\\$FILE/ArtigoCoriolis.pdf](http://www.br.endress.com/eh/sc/america/br/pt/resourceadditional.nsf/imgref/Download_ArtigoCoriolis.pdf/$FILE/ArtigoCoriolis.pdf) > . Acesso em 01 julho 2011, 19:44.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Apresenta as definições e especificações da plataforma LabVIEW**. Disponível em:< <http://www.ni.com/gettingstarted/labviewbasics/pt/environment.htm> > Acesso em: 08 out. 2012

NATIONAL INSTRUMENTS. **Apresenta documentação técnica do instrumento**. Disponível em:< <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-10/lang/pt> > Acesso em 10 outubro 2012.

NÓBREGA F. Diego, Ana Maria VALENÇA G. Ana Mariab, SANTIAGO M. Bianca, CLAUDINO V. Lígia, LIMA L. Aline, VIEIRA I. Thiago, LIRA M. Arthur **Propriedades físico-químicas da dieta líquida gaseificada: um estudo in vitro** Rev Odontol UNESP. 2010; 39(2): pg. 72

OLIVEIRA, G. H. H. et al. **Controle do amadurecimento de goiabas pedro sato tratadas por frio.** Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.6, n.9, 2010 01-15p.

PIETTE E, LENOIR J, REYCHLER H. **The diagnostic limitations of ultrasonography in maxillofacial surgery.** J Craniomaxillofac 1987; 15(6): 297-305

POTTER, M.C.; WIGGERT, D.C. **Mecânica dos Fluidos.** Thomson Learning Ltda, Brasil, Tradução da 3ª edição norteamericana, 2002.

QUIMIS. **Apresenta documentação técnica do instrumento.** < <http://www.quimis.com.br/produtos.php?cat=8&sub=31&prod=156> > Acesso em 12 outubro 2012.

REZAZADEH, G.; GHANBARI, M.; MIRZAEI, I. & KEYVANI, A; **On the modeling of a piezoelectrically actuated microsensor for simultaneous measurement of fluids viscosity and density Measurement**, 2010, 43, 1516 – 1524.

RIJAL K., R. MUTHARASAN, **Piezoelectric-excited millimeter-sized cantilever sensors detect density differences of a few micrograms/mL in liquid medium**, Sensors and Actuators B: Chemical 124 (2007) 237–244.

ROBERTS S., **Phys.** Rev. 71, 890-895 (1947)

SORAB, J.; ALLEN, R.H.; GONIK, B.; **Tactile sensory monitoring of clinician-applied forces during delivery of newborns**, IEEE Trans.Biomed. Eng. 35 (12) (1988) 1090.

SORAN, IOAN F.; SZTOJANOV, I; **Some Methods to Improve the evaluation of amplitude spectrum given by FFT**, ELECTRONICS', Sozopol, BULGARIA, 19 – 21 September, 2007,

VEGA. **Apresenta documentação técnica do instrumento.** Disponível em: < <http://www.vega.com/downloads/PI/PT/37281-PT.PDF> > Acesso em 24/11/2012.

VIÉGAS, F.C.P. **A citricultura brasileira**, 2. ed Campinas, Cargill,1991.

WASZCZUK, K.; PIASECKI, T.; NITSCH, K. & GOTSZALK, T; **Application of piezoelectric tuning forks in liquid viscosity and density measurements** Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 160, 517 – 523.

WEN, F.-L.; YEN, C.-Y. & OUYANG, M. **Thin-disk piezoceramic ultrasonic motor. Part I: design and performance evaluation** Ultrasonics, 2003, 41, 437 - 450

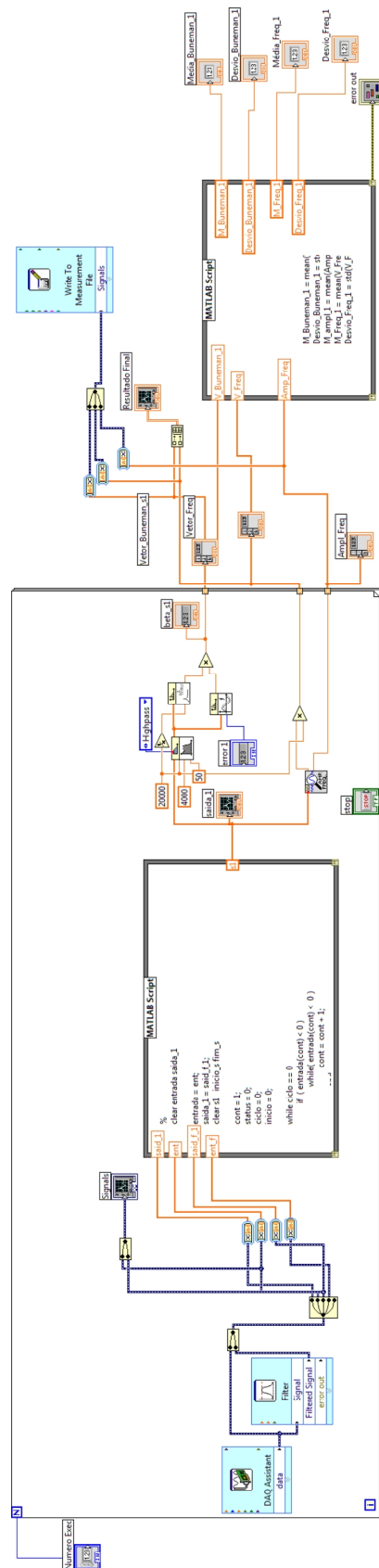
WILSON T.L., CAMPBELL G.A., MUTHARASAN R.; **Viscosity and density values from excitation level response of piezoelectric-excited cantilever sensors**, Sensors and Actuators A 138 (2007) 44–51.

ZHANG, Jian et AL; **Determination of liquid density with a low frequency mechanical sensor based on quartz tuning fork**, Sensors and Actuators B 84, Singapore, Aceito em 15 Dezembro 2001.

ANEXOS

ANEXO 1 – MÉTODO 1 – Diagrama em Bloco.....	73
ANEXO 2 – MÉTODO 1 – Script Matlab.....	74
ANEXO 3 – MÉTODO 1 – Painel Frontal	75
ANEXO 4 – MÉTODO 2 – Diagrama em Bloco.....	76
ANEXO 5 – MÉTODO 2 – Script Matlab.....	77
ANEXO 6 – MÉTODO 2 – Painel Frontal	77
ANEXO 7 – MÉTODO 3 – Diagrama em Bloco.....	78
ANEXO 8 – MÉTODO 3 – Script Matlab.....	79
ANEXO 9 – MÉTODO 3 – Painel Frontal	79
ANEXO 10 – Resultado Experimento grau Brix com verniz	80
ANEXO 11 – Resultado experimento grau Brix sem verniz	80
ANEXO 12 – Resultado RMSE grau brix.....	81

ANEXO 1 – MÉTODO 1 – Diagrama em Bloco



ANEXO 2 – MÉTODO 1 – Script Matlab

Primeiro Script

```
%
clear entrada saida_1

entrada = ent;
saida_1 = said_f_1;
clear s1 inicio_s fim_s

cont = 1;
status = 0;
ciclo = 0;
inicio = 0;

while ciclo == 0
    if ( entrada(cont) < 0 )
        while( entrada(cont) < 0 )
            cont = cont + 1;
        end
        status = 1;
    end

    if ( entrada(cont) > 0 ) && ( status == 0 )
        while( entrada(cont) > 0 )
            cont = cont + 1;
        end
        status = 1;
    end

    if ( entrada(cont) > 0 ) && ( status == 1 )
        inicio_s = cont;
        while( entrada(cont) > 0 )
            cont = cont + 1;
        end
        fim_s = cont;
        ciclo = ciclo +1;
    end

end

inicio_s = inicio_s+5;
s1=saida_1(inicio_s:fim_s);
```

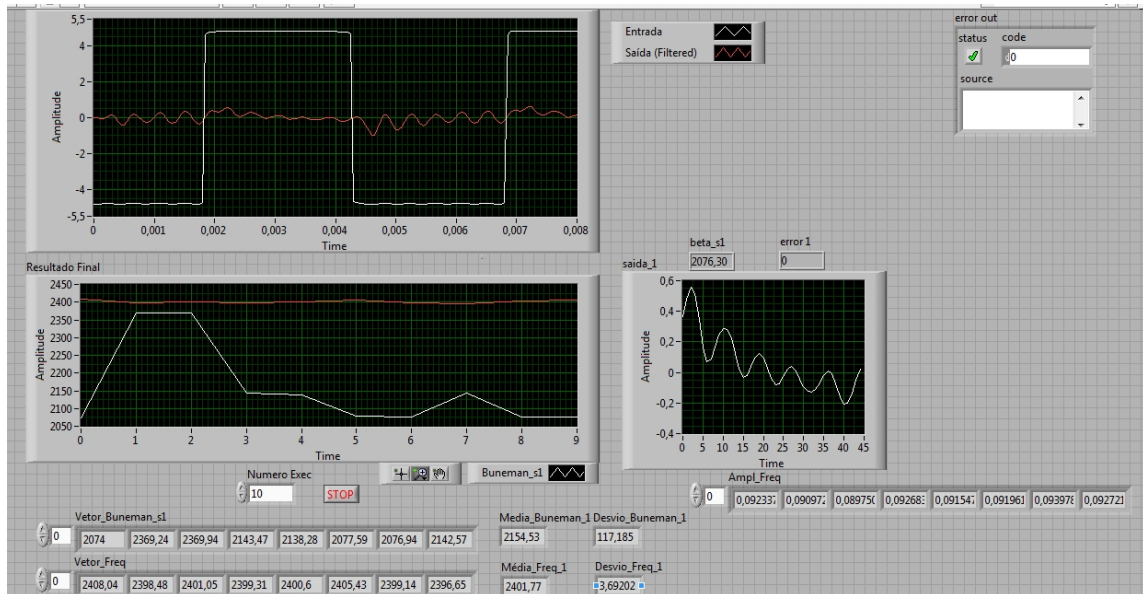
Segundo Script

```

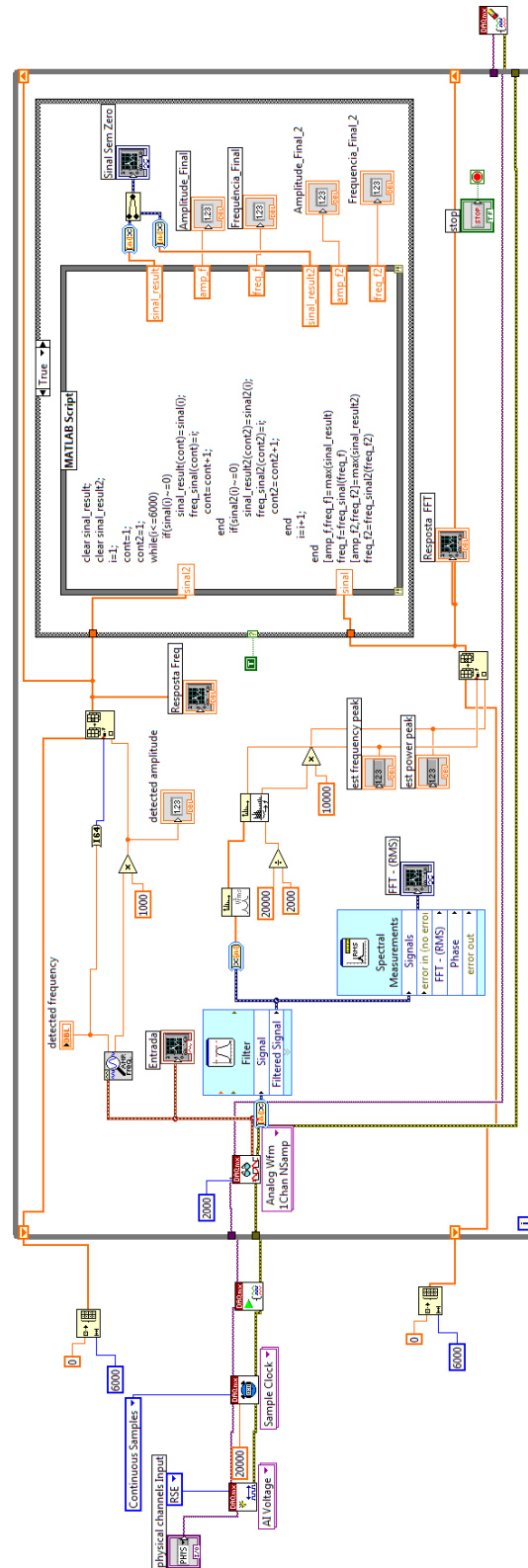
M_Buneman_1 = mean(V_Buneman_1);
Desvio_Buneman_1 = std(V_Buneman_1);
M_ampl_1 = mean(Ampl_Freq);
M_Freq_1 = mean(V_Freq);
Desvio_Freq_1 = std(V_Freq);

```

ANEXO 3 – MÉTODO 1 – Painel Frontal



ANEXO 4 – MÉTODO 2 – Diagrama em Bloco



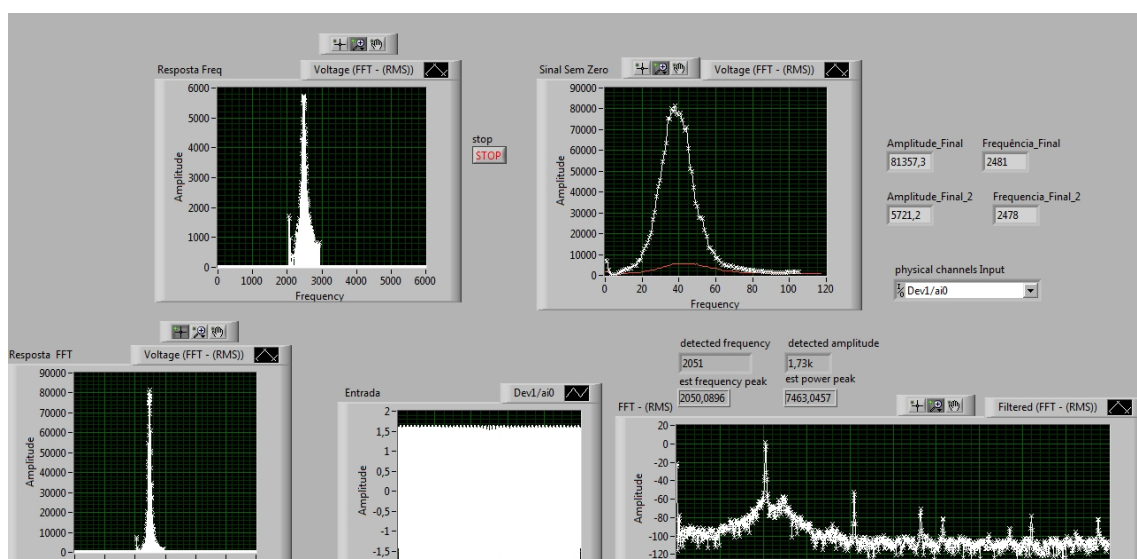
ANEXO 5 – MÉTODO 2 – Script Matlab

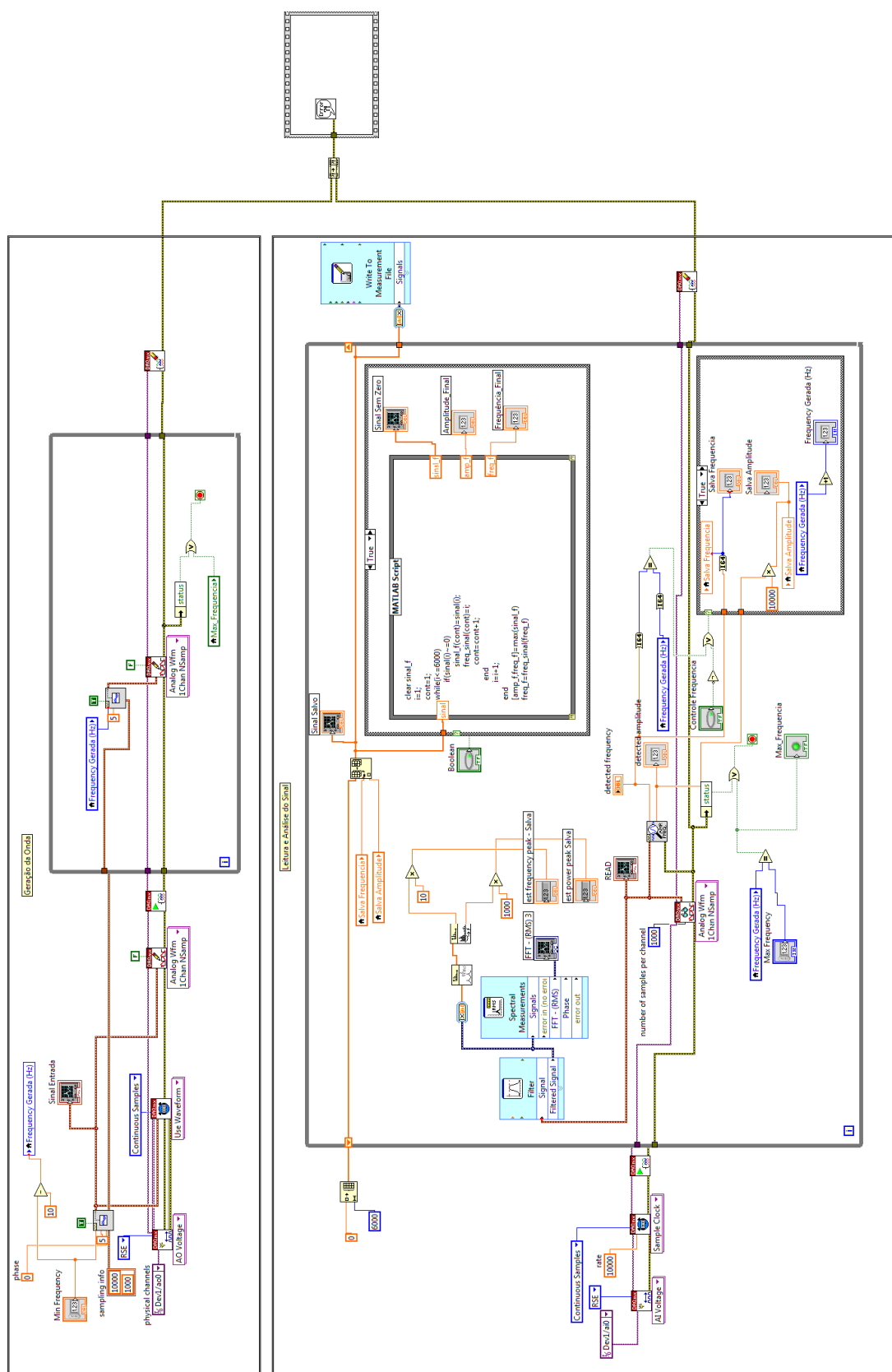
```

clear sinal_result;
clear sinal_result2;
i=1;
cont=1;
cont2=1;
while(i<=6000)
    if(sinal(i)~=0)
        sinal_result(cont)=sinal(i);
        freq_sinal(cont)=i;
        cont=cont+1;
    end
    if(sinal2(i)~=0)
        sinal_result2(cont2)=sinal2(i);
        freq_sinal2(cont2)=i;
        cont2=cont2+1;
    end
    i=i+1;
end
[amp_f,freq_f]=max(sinal_result)
freq_f=freq_sinal(freq_f)
[amp_f2,freq_f2]=max(sinal_result2)
freq_f2=freq_sinal2(freq_f2)

```

ANEXO 6 – MÉTODO 2 – Painel Frontal





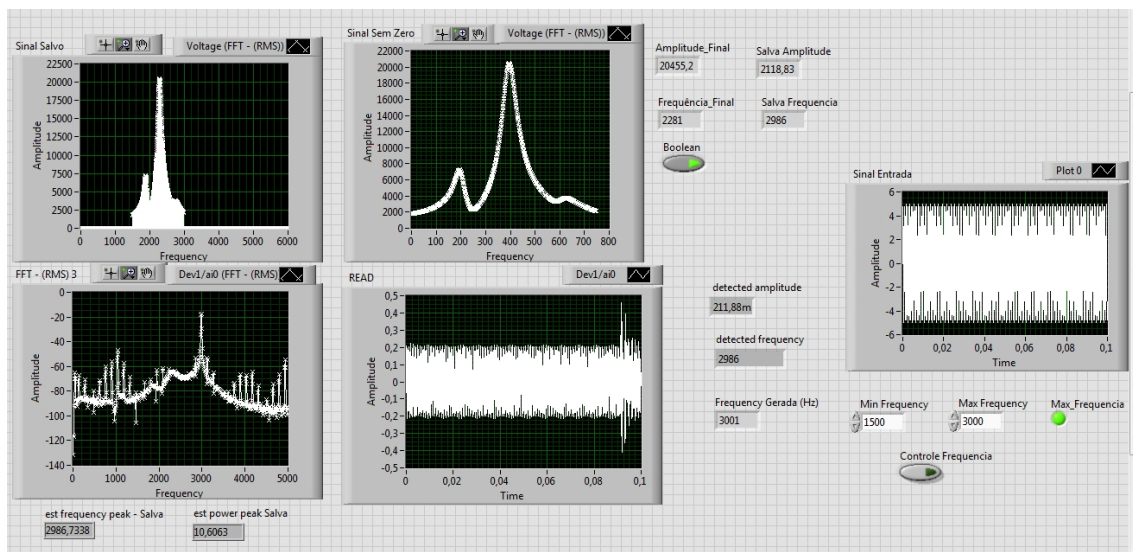
ANEXO 8 – MÉTODO 3 – Script Matlab

```

clear sinal_f
i=1;
cont=1;
while(i<=6000)
    if(sinal(i)~=0)
        sinal_f(cont)=sinal(i);
        freq_sinal(cont)=i;
        cont=cont+1;
    end
    i=i+1;
end
[amp_f,freq_f]=max(sinal_f)
freq_f=freq_sinal(freq_f)

```

ANEXO 9 – MÉTODO 3 – Painei Frontal



ANEXO 10 – Resultado Experimento grau Brix com verniz

	Frequência (Hz)					
	10°BX	20°BX	30°BX	40°BX	50°BX	60°BX
1	2359	2321	2305	2301	2251	2209
2	2353	2320	2299	2291	2249	2211
3	2351	2321	2305	2291	2251	2211
4	2351	2319	2301	2291	2251	2213
5	2353	2325	2301	2281	2251	2211
6	2353	2320	2301	2281	2251	2213
7	2353	2321	2301	2281	2251	2215
8	2355	2325	2301	2289	2251	2213
9	2355	2320	2301	2281	2251	2211
10	2361	2321	2301	2279	2251	2213
Média*	2353,00	2321,00	2301,00	2285,00	2251,00	2212,00
Desvio**	3,27	2,06	1,90	7,11	0,63	1,70
Densidade***	1,0381	1,0810	1,13	1,18	1,23	1,29

* Médias da frequência em Hz

** Desvio padrão das medidas de Frequência

*** Densidade relativa dos líquidos (g/ml)

ANEXO 11 – Resultado experimento grau Brix sem verniz

	Frequência (Hz)					
	10°BX	20°BX	30°BX	40°BX	50°BX	60°BX
1	2291	2253	2221	2191	2161	2133
2	2281	2253	2221	2189	2161	2131
3	2281	2255	2221	2189	2161	2131
4	2281	2253	2221	2190	2161	2131
5	2281	2255	2221	2189	2161	2131
6	2281	2255	2221	2191	2161	2131
7	2281	2255	2221	2191	2161	2133
8	2281	2255	2221	2191	2163	2133
9	2283	2255	2217	2191	2161	2131
10	2281	2255	2221	2191	2161	2133
Média*	2281,00	2255,00	2221,00	2191,00	2161,00	2131,00
Desvio**	3,16	0,97	1,26	0,95	0,63	1,03
Densidade***	1,0381	1,0810	1,13	1,18	1,23	1,29

* Médias da frequência em Hz

** Desvio padrão das medidas de Frequência

*** Densidade relativa dos líquidos (g/ml)

ANEXO 12 – Resultado RMSE grau brix

	Densidade (g/ml)	Densidade (g/ml)
	Com Verniz	Sem Verniz
10° Brix	0,0081686	0,0075750
20° Brix	0,0126781	0,0035053
30° Brix	0,0040466	0,0063781
40° Brix	0,0231637	0,0063327
50° Brix	0,0069494	0,0011701
60° Brix	0,0080854	0,0083894
Total RMSE	0,012207	0,006086